

AGROCAMPUS  
OUEST

☐ CFR Angers

☒ CFR Rennes



### Mémoire de Fin d'Études

Année universitaire : ....2013.- 2014.....

Spécialité : Agronomie

Spécialisation (et option éventuelle) :

Statistique Appliquée

☒ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Le foreur ponctué de la canne à sucre, *Chilo sacchariphagus*, à l'île de la Réunion :  
précision de l'échantillonnage, estimation des pertes et effet de la structure du paysage sur  
l'intensité des dégâts

Maryse Wong-Ah-See



**Soutenu à Rennes le 4 Septembre 2014**

**Devant le jury composé de :**

Président :

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Maître de stage : Samuel Nibouche

Frédéric Chiroleu

Enseignant référent : David Causeur

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

## Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

### **Confidentialité :**

☐ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible<sup>(1)</sup>.

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).

Date et signature du maître de stage<sup>(2)</sup> :

### **Droits d'auteur :**

L'auteur<sup>(3)</sup> autorise la diffusion de son travail

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☒ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

### **Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :**

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

---

# Remerciements

---

Je tiens à remercier en premier lieu les organismes et personnes partenaires de cette étude : le groupe Tereos, le CTICS, la FDGDON, Mr. Régis Goebel et le CIRAD pour m'avoir fourni les données et matériel nécessaires à mes analyses et m'avoir ainsi permis de réaliser ce stage.

Je remercie également mes maîtres de stage, Samuel Nibouche et Frédéric Chiroleu, pour leur ô combien précieux apport en matière de connaissance, d'encadrement et de relecture et pour m'avoir ainsi guidée tout au long de ce stage, de ces analyses et de ce mémoire en me conseillant, me corrigeant et en répondant à mes questions.

Merci également à Laurent Costet pour les échanges concernant la canne à sucre et pour le partage de bureau, à Sandrine pour son aide statistique et à Maxime pour son appui durant les analyses de paysage.

Un merci à l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu discuter de *Chilo sacchariphagus*, de canne à sucre, statistiques, de la Réunion en général, ou de tout autre sujet lié de près ou de loin à cette étude : quoi qu'en fût le fond, ces échanges furent toujours enrichissants.

De plus, un grand “*Merci !*” à Anaïs et Clément pour ce mois de stage commun qui fut bref mais intense, à la joyeuse bande du master BEST pour les pauses du midi et le soutien de l'après-midi, à Béatrix, Lucie, Lucille, Sarah et Solène pour les discussions et rigolades intra-box, les pauses déjeuner et les sorties.

Enfin, une mention spéciale à Thomas pour les pauses thé, les discussions foreur sérieuses et pour ces pauses labo salvatrices de mon équilibre mental durant les périodes d'analyse intense.

# Table des matières

<b>Contexte</b>	<b>1</b>
<b>1 Étude bibliographique</b>	<b>2</b>
1.1 Théorie sur les méthodes d'échantillonnage . . . . .	2
1.2 Relations entre dégâts et dommages . . . . .	3
1.3 Effet de la structure du paysage sur les niveaux de dégâts . . . . .	4
1.4 Objectifs de l'étude . . . . .	5
<b>2 Estimation de la précision du protocole d'échantillonnage</b>	<b>5</b>
2.1 Matériel et méthode . . . . .	5
2.1.1 Estimation des paramètres de la loi de distribution d'ENA . . . . .	5
2.1.2 Intervalle de confiance de $k$ . . . . .	7
2.1.3 Test des effets variétés et mois sur le paramètre $k$ . . . . .	7
2.1.4 Précision des estimations . . . . .	7
2.2 Résultats . . . . .	8
2.2.1 Valeur et intervalles de confiance de $k$ . . . . .	8
2.2.2 Test de l'effet variété sur le paramètre $k$ . . . . .	8
2.2.3 Précision des estimations . . . . .	9
<b>3 Mise en évidence des liens entre dégâts et dommages</b>	<b>10</b>
3.1 Fonction de dommage sur la richesse en sucre . . . . .	10
3.1.1 Matériel et méthode . . . . .	10
3.1.2 Résultats . . . . .	11
3.2 Fonction de dommage sur la masse des tiges . . . . .	11
3.2.1 Matériel et méthode . . . . .	11
3.2.2 Résultats . . . . .	14
3.3 Application : simulation de dégâts et calcul des pertes associées à l'échelle de la zone cannière . . . . .	14
3.3.1 Matériel et méthode . . . . .	15
3.3.2 Résultats . . . . .	15
<b>4 Effet de la structure du paysage sur les niveaux de dégâts</b>	<b>16</b>
4.1 Matériel et méthode . . . . .	16
4.1.1 Données . . . . .	16
4.1.2 ACP sur les variables de structure du paysage . . . . .	18
4.1.3 Modèle linéaire généralisé de l'effet des différents indices sur les dégâts . . . . .	18
4.2 Résultats . . . . .	18
4.2.1 ACP sur les variables de structure du paysage . . . . .	18
4.2.2 Modèle linéaire généralisé de l'effet des différents indices sur les dégâts . . . . .	19
<b>5 Discussion et perspectives</b>	<b>20</b>
5.1 Résultats obtenus . . . . .	20
5.1.1 Précision du protocole d'échantillonnage . . . . .	20
5.1.2 Relations dégâts/dommages . . . . .	21
5.1.3 Analyse de la structure du paysage . . . . .	21
5.2 Limites et perspectives . . . . .	21
5.2.1 Précision du protocole d'échantillonnage . . . . .	21
5.2.2 Relations dégâts/dommages . . . . .	21
5.2.3 Analyse de la structure du paysage . . . . .	22
<b>Conclusion générale</b>	<b>22</b>
<b>Références</b>	<b>25</b>
<b>Annexes</b>	<b>26</b>

## Liste des figures

1	Schématisation du niveau d'attaque moyen ( $\mu_p$ ) et de son estimation ( $\mu_c$ ) . . . . .	6
2	Précision de l'estimation de la moyenne d'attaque d'une parcelle . . . . .	9
3	Exemples de zones tampon traitées avec ArcGIS . . . . .	17
4	ACP sur les proportions surfaciques . . . . .	19
5	ACP sur les indices de structure du paysage . . . . .	19
6	Représentation graphique de l'intervalle de confiance de $k$ . . . . .	26
7	Paramètre d'agrégation au cours du temps pour la variété R 570 . . . . .	27
8	Paramètre d'agrégation au cours du temps pour les variétés R 577 et R 579 . . . . .	27
9	Précision de l'estimation de $\mu_p$ selon la valeur de $k$ . . . . .	28
10	Prix de la tonne de canne en fonction de sa richesse en sucre . . . . .	28
11	Emplacement des parcelles géoréférencées . . . . .	30
12	Exemple de modélisation d'attaque moyenne sur un chargement $\mu_c$ . . . . .	31

## Liste des tableaux

1	Estimation et intervalle de confiance du paramètre d'agrégation . . . . .	8
2	Estimation et intervalles de confiance des effets fixes de la modélisation de la masse d'une tige . . . . .	14
3	Simulation de dégâts faibles à l'échelle de la zone cannière . . . . .	15
4	Simulation de dégâts moyens à l'échelle de la zone cannière . . . . .	16
5	Simulation de dégâts forts à l'échelle de la zone cannière . . . . .	16
6	Effet des indices de structure du paysage sur les attaques . . . . .	20
7	Variables qualitatives des données de sondage . . . . .	26
8	Nombre de chargements ayant un ENA moyen différent de 0 pour chaque modalité des variables qualitatives du jeu de données sur la richesse . . . . .	29
9	Effet des attaques sur la richesse en sucre . . . . .	29
10	Analyse de variance des effets du modèle de la richesse en sucre . . . . .	29
11	Valeur des effets aléatoires sur la masse d'une tige . . . . .	30
12	Variables qualitatives des données de structure du paysage . . . . .	30
13	Effet de la taille de l'échantillon sur l'estimation des attaques sur plusieurs parcelles . . . . .	30

## Glossaire

**Campagne** : période de récolte de la canne à sucre, se déroulant de juillet à décembre

**Centre** : lieu de pesée des chargements de canne après la coupe

**CTICS** : Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre

**ENA** : nombre d'entre-noeuds attaqués sur une tige

**Ennemi naturel** : prédateur, parasitoïde ou pathogène d'un ravageur

**ENT** : nombre total d'entre-noeuds d'une tige

**FDGDON** : Fédération Départementale des Groupements de Défense contre les Organismes Nuisibles

**Insecte ravageur** : insecte nuisible pour les cultures agricoles, pour les arbres et la végétation en général

**Monophage** : espèce d'insecte effectuant son cycle complet sur une seule espèce de plante-hôte

**Ooplaque** : ensemble d'oeufs d'insectes pondus par une même femelle et disposés en amas

**Prix usine** : prix reversé à l'agriculteur pour sa récolte, proportionnel au tonnage de canne récolté et à la richesse (teneur en saccharose) des cannes

**Ravageur** : insecte ravageur

**Ravine** : torrent prenant naissance dans les montagnes et creusant son lit profondément dans des reliefs escarpés

**Végétation spontanée** : surface non utilisée dans un but agricole, non arborée et non bâtie (jardins, talus, bords de routes, friches...)

**ZINB** : loi de distribution Zero Inflated Negative Binomial

**%ENA** : pourcentage d'entre-noeuds attaqués sur une tige ( $= \frac{ENA}{ENT}$ )

## Contexte

A l'île de la Réunion, la culture de la canne à sucre représente près de 60% de la surface agricole utile (DAAF 974, 2013). Cette culture génère dix-huit mille emplois et joue un rôle important dans le secteur agroalimentaire de l'île en lui fournissant son premier produit d'exportation, le sucre. La canne intervient également dans ce secteur avec la fabrication du rhum, mais aussi dans le secteur énergétique, grâce à la combustion des résidus de pressage (8% de la production d'électricité) et préserve l'environnement grâce à ses propriétés antiérosives. La filière représente donc un pilier de l'économie et de la vie de l'île (Syndicat du sucre de la Réunion, 2014).

La canne à sucre est une graminée tropicale dont la tige est riche en sucre. Celle-ci est divisée en segments appelés entre-noeuds qui se forment successivement au cours de la croissance : les entre-noeuds les plus âgés se trouvent à la base et les plus jeunes au sommet. Un seul plant est constitué de plusieurs tiges dressées et constitue une touffe. La canne à sucre est une plante pluriannuelle, coupée chaque année entre juillet et décembre lors de la période appelée campagne sucrière. La coupe de la canne se fait de façon manuelle ou mécanisée, les cannes livrées en usine sont soit entières (coupe manuelle ou mécanique), soit tronçonnées (coupe mécanique). La reprise de croissance de la canne se fait après la coupe à partir de la partie souterraine des tiges coupées, appelée "plateau de tallage". Les plants doivent être renouvelés environ tous les sept ans afin de ne pas perdre en qualité. La canne est menacée sur l'île par deux principaux ravageurs : le vers blanc, *Hoplochelus marginalis* (Coleoptera : Melolonthidae), et le foreur ponctué, *Chilo sacchariphagus* (Lepidoptera : Crambidae). Le premier représentait un danger pour la filière autour des années 80 jusqu'à ce qu'une solution de lutte biologique soit trouvée dans les années 90 (Jeuffrault et al., 2004). Il est actuellement sous contrôle et ne provoque plus de pertes économiques. Le second est actuellement classé numéro un des priorités phytosanitaires pour la filière cannière à la Réunion (Côte et al., 2011).

Le foreur ponctué de la canne à sucre, *Chilo sacchariphagus*, est un lépidoptère monophage dont les larves se nourrissent de l'intérieur des tiges de canne à sucre. Situées sur les feuilles de canne lors de leur éclosion, les larves pénètrent dans la tige au niveau des jeunes entre-noeuds en y perforant un trou généralement peu visible à l'oeil nu. Une fois à l'intérieur, elles y creusent des galeries et y effectuent l'ensemble de leur cycle larvaire avant de forer un trou de sortie et de se chrysalider dans la tige pendant 15 jours à l'issue desquels émerge le papillon. Le cycle total œuf à œuf de *C. sacchariphagus* dure en moyenne deux mois et se déroule sans diapause : plusieurs générations se succèdent au cours de l'année. L'infestation de parcelles de canne en cours de croissance se fait à partir de parcelles alentour plus développées.

Il existe plusieurs méthodes de lutte contre ce ravageur : la mise en place de variétés de canne résistantes à l'insecte, notamment R 570, majoritairement cultivée à la Réunion (Rochat et al., 2001), des lâchers inondatifs de trichogrammes (parasitoïdes des oeufs de *C. sacchariphagus*) (Soula et al., 2003) et l'utilisation de bordures de plantes pièges, composées d'*Erianthus arundinaceus*, attractives pour les femelles mais qui ne permettent pas le développement des larves (Nibouche et al., 2012).

Ces méthodes de lutte sont utilisées en prévention de l'infestation et non en tant que méthodes curatives : elles ne peuvent pas être mises en place en utilisant des seuils économiques de nuisibilité. De plus, elles présentent certaines contraintes : il existe une corrélation génétique négative entre la résistance variétale et le potentiel de production (Nibouche & Tibère, 2008) ; l'utilisation des bordures pièges implique un aménagement spécifique des parcelles de canne et une gestion de la biomasse d'*Erianthus* ; les lâchers de trichogrammes sont coûteux et fastidieux.

L'utilisation de ces méthodes de lutte doit donc être ciblée et ne concerner que les parcelles subissant de forts dégâts aux conséquences économiques importantes. Cependant, les pertes économiques provoquées par les dégâts ne sont pas connues avec précision : on ne sait pas chiffrer à partir de quel niveau les dégâts ont un impact économique, et on ne sait pas quelles sont les parcelles qui sont dans cette situation.

Goebel (1999), a réalisé une première étude sur *C. sacchariphagus* et réalisé une cartographie des dégâts provoqués à la Réunion durant les campagnes de 1996 à 1998. Depuis 2012, un suivi du ravageur dont les résultats sont transmis au Bulletin de Santé du Végétal (BSV) a été mis en place dans le cadre du plan Ecophyto. En 2013, un second dispositif de suivi a été mis en place par le groupe Tereos, qui possède les deux raffineries de sucre de l'île. L'objectif de ces suivis est de cartographier les zones touchées par les dégâts de *C. sacchariphagus*.

Cependant, aucune analyse statistique n'a été réalisée pour quantifier la précision de ces suivis. De plus, la relation entre la densité d'infestation (nombre de ravageurs par unité de surface) et les pertes économiques n'est pas connue. Enfin, on ne sait pas si l'intensité des attaques est aléatoire ou si elle dépend de facteurs biotiques ou abiotiques propres à la parcelle.

Le but de cette étude est donc d'établir un état des lieux de l'infestation par *C. sacchariphagus* à la Réunion en comblant les points manquants dans la connaissance du sujet.

## 1 Étude bibliographique

### 1.1 Théorie sur les méthodes d'échantillonnage

On évalue le niveau d'attaque d'un ravageur d'après le nombre d'insectes ou de dégâts par unité d'observation. Pour cela, on réalise des plans d'échantillonnage reposant sur la théorie des sondages afin de pouvoir estimer la valeur de la vraie population à partir de celle d'un échantillon. La taille de l'échantillon doit être choisie comme un compromis entre la réduction des coûts des travaux d'échantillonnage (main d'oeuvre, temps, quantité acceptable par les agriculteurs) et l'assurance d'une certaine précision sur l'estimation. Afin de déterminer la relation entre taille de l'échantillon et précision de l'estimation, il est nécessaire de connaître la distribution du ravageur à l'échelle de l'unité d'observation (Binns et al., 2000), ici la tige .

L'étude de la distribution d'un insecte peut se faire de façon probabiliste ou statistique. La méthode probabiliste consiste à déterminer la loi de distribution alors que la méthode statistique ne fait que caractériser celle-ci (Badenhausser, 1989). La méthode statistique consiste à utiliser une relation permettant de prédire la variance d'un sondage en fonction de sa moyenne, les deux principales relations sont celles de Taylor et d'Iwao :

$$\textbf{Taylor} : \sigma^2 = (a + 1)\mu + (b - 1)\mu^2$$

$$\textbf{Iwao} : \sigma^2 = a\mu^b$$

En ajustant ces modèles aux données, on estime les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$ . Ce dernier permet de décrire le type de répartition de l'insecte : lorsque  $b < 1$ , l'insecte est réparti uniformément sur l'unité d'observation, lorsque  $b = 1$  il l'est aléatoirement et lorsque  $b > 1$  il est agrégé sur certaines unités d'observation préférentiellement (Badenhausser, 1989). La méthode probabiliste permet d'ajuster une loi de distribution aux comptages d'insectes, le résultat constitue ensuite la base des protocoles d'échantillonnage et permet d'évaluer leurs performances (Binns et al., 2000), ce qui n'est pas possible directement avec la simple approche statistique. Selon le type de la répartition, on cherchera à ajuster une



distribution de Poisson (répartition aléatoire), une distribution Uniforme (répartition uniforme) ou une distribution Binomiale Négative (répartition agrégative) (Binns et al., 2000).

Par expérience, il a été montré que les insectes et leurs dégâts ont tendance à être agrégés (Binns et al., 2000). Cela s’explique notamment par les caractéristiques biologiques des insectes : par exemple la ponte des oeufs en ooplaque pour *C. sacchariphagus*.

La loi binomiale négative (notée BN par la suite) est une loi de probabilité discrète utilisée pour les données de sondage où la variance est supérieure à la moyenne, ce qui traduit bien le phénomène d’agrégation. Elle doit être déterminée pour chaque situation (différents lieux, différentes espèces) (Ali et al., 1998). La loi BN possède deux paramètres :  $k$  et  $\mu$ .  $k$  est dit paramètre d’agrégation et est spécifique à chaque espèce.  $\mu$  est le nombre moyen d’insectes par unité de sondage. Pour déterminer la loi BN exacte, il existe plusieurs façons d’estimer le paramètre  $k$  : en utilisant les relations moyenne-variance (Binns et al., 2000), la méthode des moments ou par maximum de vraisemblance. Cette dernière est la meilleure méthode d’estimation (Bliss & Fisher, 1953).

La seule étude faite sur la distribution de *C. sacchariphagus* à la Réunion est celle de Goebel (1999). Ce travail préliminaire, réalisé à partir de données recueillies sur deux parcelles de la variété R 579 suivies durant trois ans, s’est intéressé à la loi de distribution du pourcentage d’entre-noeuds attaqués par tige (noté %ENA), ajustée à une loi binomiale surdispersée  $B(n, p)$ . Cette approche suppose que *C. sacchariphagus* est en mesure d’attaquer tous les  $n$  entre-noeuds de l’échantillon de tiges avec la même probabilité  $p$ . Or, les études du comportement alimentaire de *C. sacchariphagus* ont montré que l’entrée des chenilles se fait uniquement dans les entre-noeuds immatures situés immédiatement sous le méristème de la tige (Nibouche & Tibère, 2010). Ce processus biologique s’accorde mal à un phénomène de type binomial, et pour cette raison nous avons préféré décrire la loi du nombre d’entre-noeuds attaqués (ENA) par tige en utilisant classiquement une loi BN.

## 1.2 Relations entre dégâts et dommages

La connaissance de la densité des populations de *C. sacchariphagus* est insuffisante pour connaître son impact économique. Il est donc nécessaire de quantifier au préalable les dégâts et les niveaux de dommages sur la production pour ensuite établir la relation entre les deux termes (Nutter et al., 1993).

Pedigo et al. (1986), en donnant la définition dont se sont inspirés Aubertot et al. (2005), repris par Launais et al. (2014), pour proposer une terminologie francophone.

Un **dégât (ou symptôme)** est “l’effet de l’activité d’un ravageur sur la physiologie de son hôte”, dans notre cas, les entre-noeuds attaqués. A un certain niveau (au seuil biologique de nuisibilité), ces attaques provoquent des **dommages**, “pertes de caractéristiques d’intérêt de l’hôte, comprenant le rendement, la qualité et l’esthétique”, dans notre cas la perte de masse des tiges et la perte de teneur en sucre. Ces dommages, s’ils dépassent le seuil de nuisibilité économique, vont engendrer des **dégâts économiques** qui représentent les conséquences monétaires des attaques (Nutter et al., 1993).

Une chaîne de relations lie ces différentes variables (Nutter et al., 1993). Le lien entre dégâts et dommages est la **fonction de dommage**. Celle-ci peut ne pas être linéaire. Il peut exister plusieurs fonctions de dommage lorsque les attaques affectent plusieurs caractéristiques intéressantes de l’hôte (Tammes, 1961) : dans notre cas, la masse des tiges et la richesse en sucre. Le coefficient de cette fonction est le **coefficient de dommage**, il peut donc y en avoir plusieurs. Le deuxième lien est celui entre les dommages et les pertes économiques, il s’agit de la **fonction de perte**.

Dans le cas de *C. sacchariphagus*, les dégâts sont les galeries forées par les chenilles dans les tiges. Ils sont quantifiés par le nombre d’entre-noeuds attaqués par tige. Les dom-

mages sont doubles : d'une part une perte de "rendement canne", c'est-à-dire une réduction de la biomasse fraîche de tiges de canne récoltées par unité de surface et d'autre part une réduction de la richesse, c'est-à-dire de la teneur en saccharose de la biomasse de canne récoltée.

La seule étude des relations dégâts/pertes sur *C. sacchariphagus* à la Réunion est celle de [Goebel et al. \(1999\)](#) dans laquelle est étudiée la relation linéaire entre le %ENA et le rendement d'une parcelle. D'autres études ont été réalisées sur *C. sacchariphagus* à l'île Maurice ([Rajabalee et al., 1990](#)) et en Indonésie ([Goebel et al., 2013](#)), sur l'effet d'une augmentation du pourcentage d'entre-noeuds attaqués (%ENA) sur des variables de masse, fibres et sucre. Ces relations ont aussi été étudiées sur d'autres espèces de foreurs de canne à sucre à travers le monde, en Afrique du Sud ([Goebel et al., 2005](#); [Goebel & Way, 2003](#)) et aux États-Unis ([Legaspi et al., 1999](#); [White et al., 2008](#)). Toutes ces études quantifient les dégâts en %ENA et utilisent une relation linéaire entre dégâts et dommages.

Ces études estiment la fonction de dommage sur le rendement de parcelles expérimentales dans des essais comparant différents niveaux de protection contre les foreurs (donc différents niveaux d'infestation) ([Goebel, 1999](#); [Goebel & Way, 2003](#); [Goebel et al., 2013](#); [White et al., 2008](#)) ou directement l'effet du %ENA sur des rendements parcellaires estimés ([Legaspi et al., 1999](#); [Rajabalee et al., 1990](#)). Ne disposant pas du rendement des parcelles dans notre jeu de données, nous avons utilisé une approche différente, en cherchant à estimer l'effet des dégâts sur la masse de tiges individuelles. De ce fait, nous n'avons pas utilisé le %ENA comme mesure de dégâts car ce dernier dépend du nombre total d'entre-noeuds (noté ENT) auquel est fortement lié la masse d'une tige. En effet, comme la masse d'une tige est proportionnelle à ENT et le %ENA inversement proportionnel à ENT, cela implique que le %ENA est alors inversement proportionnel à la masse d'une tige : ceci peut biaiser la fonction de dommage.

### 1.3 Effet de la structure du paysage sur les niveaux de dégâts

Afin d'identifier les parcelles où des mesures de contrôle préventives sont justifiées, il est nécessaire de savoir si les infestations sont aléatoires ou s'il existe des zones à risque et quels sont les facteurs de risque. Dans le cas où certaines zones seraient plus sensibles à *C. sacchariphagus* que d'autres, il est intéressant de savoir quels sont les facteurs, biotiques ou abiotiques, qui expliqueraient cela. L'**écologie du paysage** est l'étude des interactions entre l'organisation de l'espace et les processus écologiques ([Soti, 2013](#)) dont les infestations par les ravageurs. [Bianchi et al. \(2006\)](#), répertorient les relations entre les différents paysages, les ravageurs et leurs ennemis naturels mises en évidence dans plusieurs études. Il existe deux grands types d'habitats dans un espace cultivé : les habitats cultivés et non cultivés. Les **habitats cultivés** sont des habitats éphémères soumis à des perturbations importantes fréquentes. Les **habitats non cultivés** sont les zones arborées (forêts, haies) ou herbeuses (bordures de parcelles, prairies) et sont des espaces plus stables ([Bianchi et al., 2006](#)).

Ces deux types d'habitats ont des effets potentiels différents sur les populations de ravageurs d'une parcelle cultivée, effets qui peuvent être directs ou indirects. Les effets directs influencent les populations des ravageurs, les effets indirects influencent les populations d'ennemis naturels des ravageurs. Plusieurs mécanismes entrent en jeu dans le contrôle de ces populations d'insectes.

Tout d'abord, le caractère cultivé ou non de l'habitat a un impact sur la biodiversité globale. L'intensification des cultures a provoqué un rapide déclin de la biodiversité dans les agroécosystèmes à cause des changements de paysage ([Robinson & Sutherland, 2002](#), dans [Bianchi et al. \(2006\)](#)). En effet, les espaces cultivés, de par leur caractère instable

et éphémère, constituent des habitats hostiles pour beaucoup d'espèces qui se concentrent donc dans les espaces non cultivés plus stables (Barr et al. 1993 ; Kleijn et al. 2001 ; Meek et al. 2002 dans [Bianchi et al. \(2006\)](#)), souvent sources de pollens, de nectars et de stabilité thermique (Bugg et al. 1998, Forman & Baudry 1984 dans [Bianchi et al. \(2006\)](#)). Ces espaces sont donc favorables aux populations d'insectes et à l'augmentation de leurs activités. Les paysages présentant une forte proportion d'habitats non cultivés sont donc plus riches en espèces d'insectes, ravageurs comme ennemis naturels.

Les auxiliaires entomophages agissent en général sur de plus petites échelles que les ravageurs, ils sont donc plus sensibles que ces derniers à l'éloignement de leurs habitats (Zabel & Tschardt 1998 ; Kruess & Tschardt 2000 ; Cronin 2004 dans [Bianchi et al. \(2006\)](#)). Plus les zones cultivées seront éloignées des zones non cultivées (grands espaces cultivés continus), c'est-à-dire moins l'espace sera fragmenté, moins il y aura de transfert d'ennemis naturels : sur 24 études, 18 ont montré que les habitats complexes étaient liés à une augmentation des populations d'ennemis naturels ([Bianchi et al., 2006](#)). L'effet direct de la fragmentation sur les populations de ravageurs est moins évident : sur 10 études, 5 ont montré un effet négatif, 4 un effet neutre et 1 un effet positif.

La structure du paysage a donc potentiellement un effet sur le contrôle naturel des ravageurs, surtout par le biais des populations d'ennemis naturels que l'on retrouve surtout dans des habitats complexes présentant un important réseau de zones non cultivées. L'action directe de la structure du paysage sur les populations de ravageurs est plus discutée, les études ne concordant pas sur les résultats qui dépendent beaucoup du contexte ([Bianchi et al., 2006](#)).

## 1.4 Objectifs de l'étude

L'objectif de notre étude est d'appuyer les réseaux d'épidémiosurveillance de *C. sacchariphagus*. Pour cela, nous nous sommes intéressés à :

1. l'estimation de la précision des sondages, en utilisant une approche probabiliste pour ajuster une loi BN à la distribution d'ENA.
2. l'estimation des dommages et des pertes économiques en établissant les relations entre dégâts et pertes de rendement d'une part et pertes de richesse d'autre part
3. l'analyse des effets de la structure du paysage sur les niveaux de dégâts.

## 2 Estimation de la précision du protocole d'échantillonnage

### 2.1 Matériel et méthode

#### 2.1.1 Estimation des paramètres de la loi de distribution d'ENA

On cherche donc à déterminer la distribution du ravageur à l'échelle de notre unité d'échantillon, la tige. Pour cela, un protocole d'échantillonnage a été mis en place en 2013 par le groupe sucrier Tereos. Nous analysons les données de la récolte 2013 qui a lieu entre juillet et décembre.

**Données** Le recueil des données se fait sur chacun des treize centres de réception répartis sur l'île, où les planteurs de canne livrent les cannes coupées sous forme de chargements. Les chargements de canne sont pesés, et des analyses sont réalisées pour estimer la richesse en sucre du chargement. Chaque chargement provient d'une seule parcelle. Les agents chargés des observations choisissent aléatoirement de 1 à 31 chargements par jour. Dans chacun de ces chargements, vingt tiges sont prélevées au hasard. Pour chacune d'entre elles, on

compte ENA, c'est-à-dire le nombre d'entre-noeuds perforés par tige. On en déduit  $\mu_c$ , l'ENA moyen sur le chargement, qui est l'estimateur de l'ENA moyen sur la parcelle,  $\mu_p$  (voir figure 1). Le jeu de données contient également comme variables la date de coupe des tiges, le centre de réception (indicateur géographique de la parcelle sur l'île), la variété de canne et le type de coupe utilisée (voir résumé des variables qualitatives en annexe, tableau 7). Le jeu de données est constitué en lignes de 19 800 tiges et en colonnes des variables citées complétées par une variable codant le chargement.

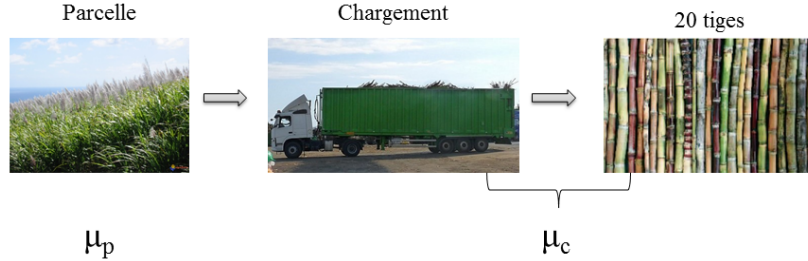


FIGURE 1 – Schématisation du niveau d'attaque moyen ( $\mu_p$ ) et de son estimation ( $\mu_c$ )

Dans la majorité des cas, il n'y a qu'une seule chenille par entre-noeud attaqué : on peut donc considérer qu'un entre-noeud attaqué correspond à un insecte (Nibouche S., données non publiées). Ainsi, dans la suite de cette étude, nous avons considéré que ENA correspondait au nombre d'insectes sur une tige : on confondra par la suite ENA et nombre d'insectes par tige.

**Détermination de la loi BN** On cherche à ajuster la loi  $BN(k, \mu_p)$  que suit ENA pour une parcelle (et donc un chargement) donnée. Soit ENA, le nombre d'entre-noeuds attaqués sur une tige provenant d'une parcelle dont ENA moyen est  $\mu_p$ . Si  $ENA \hookrightarrow \mathcal{BN}(k, \mu_p)$ , alors la probabilité d'observer  $x$  s'écrit :

$$P(ENA = x) = \frac{\Gamma(k + x)}{\Gamma(k) \cdot \Gamma(x + 1)} \cdot \left(\frac{k}{k + \mu_p}\right)^k \cdot \left(\frac{\mu_p}{k + \mu_p}\right)^x \quad (1)$$

Le paramètre  $\mu_p$  est l'ENA moyen d'une parcelle. Cette valeur est inconnue mais estimée par l'ENA moyen obtenu sur les 20 tiges prélevées sur le chargement correspondant, noté  $\mu_c$  (voir figure 1). Le paramètre d'agrégation  $k$  est inconnu et dépend du comportement de l'espèce vis-à-vis d'une plante : il est caractéristique de l'espèce mais peut varier selon d'autres variables que nous allons chercher à tester par la suite.

On teste l'effet variétal sur la distribution de *C. sacchariphagus* et donc sur le paramètre d'agrégation que nous noterons  $k_{var}$ . Nous étudions trois variétés de canne majoritaires à la Réunion : R 570, R 577 et R 579. On teste l'effet de la date de récolte sur le paramètre d'agrégation que nous noterons  $k_{mois}$ . Nous avons travaillé sur les mois d'août, septembre, octobre et novembre.

**Exemple par variété** A partir des données de comptage détaillées ci-dessus, on répertorie les différentes classes de dégâts présentes (les ENA) et leur fréquence d'apparition sur les 20 tiges d'un chargement.

On travaille par variété et uniquement sur les chargements non nuls, c'est-à-dire ayant au moins 1 entre-noeud attaqué sur 20 tiges. En effet, il n'est pas possible de déterminer le paramètre d'agrégation pour une moyenne d'attaque de 0. On travaille donc sur R 570, R 577 et R 579 respectivement avec 558, 177 et 255 chargements.

A partir de la formule (1), on peut déterminer la vraisemblance pour un chargement :

$$V_{\text{chargement}} = \prod_{i=1}^{20} P(ENA = x_i)$$

et en déduire ainsi la vraisemblance que l'on cherche à maximiser, pour les  $n_v$  chargements d'une même variété :

$$V_{\text{variete}} = \prod_{n=1}^{n_v} \prod_{i_n=1}^{20} P(ENA = x_{i_n}) \quad (2)$$

où  $P(ENA = x_{i_n})$  est donné par l'équation (1). On cherche la valeur  $k_{var}$  maximisant  $V_{\text{variete}}$  (équation 2).

Sur R ([R Core Team, 2013](#)), on utilise les fonctions `dnbinom {base}` et `optim {base}` en utilisant l'algorithme de Brent.

### 2.1.2 Intervalle de confiance de $k$

Une fois les valeurs de  $k$  obtenues, on calcule un intervalle de confiance à 95%  $[k_{inf}; k_{sup}]$  tel que les bornes de cet intervalle soient des valeurs pour lesquelles l'hypothèse  $H_0 : k_{borne} = k$  soit acceptée à 95%. Les valeurs de  $k$  étant déterminées par maximum de vraisemblance, la statistique de ce test est le rapport de vraisemblance entre les deux modèles, noté  $D$  :

$$D = -2\ln\left(\frac{V_{k_{borne}}}{V_k}\right)$$

$D$  est la différence de déviance entre les deux modèles. Sous l'hypothèse  $H_0$  la statistique de test suit une loi  $\chi_{ddl}^2$  avec comme degrés de liberté (noté ddl) la différence entre les nombres de paramètres de chaque modèle : ici, on a 1 degré de liberté (voir représentation graphique en annexe, figure 6).

### 2.1.3 Test des effets variétés et mois sur le paramètre $k$

Pour tester l'effet variété sur le paramètre  $k$ , on compare les modèles avec effet et sans effet avec un test de rapport de vraisemblance. L'hypothèse nulle est le modèle sans effet, c'est-à-dire avec un paramètre  $k$  commun,  $k_c$ , aux variétés. Le nombre de degré de liberté que suit la statistique de test  $D$  sous l'hypothèse nulle est égal à 2 lorsque l'on teste le modèle avec trois paramètres contre un paramètre unique, et est égal à 1 lorsque l'on teste le modèle avec deux paramètres contre un paramètre unique.

Pour tester l'effet mois, nous nous sommes appuyés sur les intervalles de confiance des valeurs de  $k$  par mois.

### 2.1.4 Précision des estimations

La moyenne d'attaque sur la parcelle  $\mu_p$  a été estimée par la moyenne d'attaque sur les 20 tiges de son chargement,  $\mu_c$ . Il y a donc une imprécision autour de  $\mu_p$  d'autant plus importante que l'on prélève peu de tiges dans le chargement. On cherche à savoir quelle est la précision de l'estimation avec le protocole actuel et quelle serait la meilleure taille d'échantillon pour un bon compromis entre précision et coût de l'opération.

L'ENA moyen d'une parcelle,  $\mu_p$ , est estimé à partir du nombre d'entre-nœuds attaqués total trouvé sur  $\mathbf{n}$  tiges. ENA suit une  $\mathcal{BN}(k_{var}, \mu_p)$ . Pour  $\mathbf{n}$  tiges tirées indépendamment les unes des autres et issues d'une même parcelle, le nombre d'entre-nœuds attaqués total suit une  $\mathcal{BN}(\mathbf{n}k_{var}, \mathbf{n}\mu_p)$  ([Gozé et al., 2003](#)).

On détermine les intervalles de confiance exacts de  $\mu_c$  à 95%  $[\mu_{min}; \mu_{max}]$  comme suit. Soit  $F$  la fonction de distribution du nombre d'entre-nœuds attaqués sur  $\mathbf{n}$  tiges qui suit une

loi  $\mathcal{BN}(\mathbf{n}k_{var}, \mathbf{n}\mu_p)$ . D'après [Gozé et al. \(2003\)](#), les bornes  $\mu_{min}$  et  $\mu_{max}$  sont définies telles que :

$$F(\mathbf{n}\mu_{min}, x + 1) = 0.975$$

$$F(\mathbf{n}\mu_{max}, x) = 0.025$$

Cela signifie que l'observation de  $x$  entre-nœuds attaqués sur  $\mathbf{n}$  tiges est probable à 95% pour une vraie moyenne d'attaque  $\mu_p$  comprise entre  $[\mu_{min}; \mu_{max}]$ . On calcule les bornes  $[\mu_{min}; \mu_{max}]$  pour différentes valeurs de  $\mathbf{n}$  (de 20 à 100 par pas de 10) pour des valeurs de  $x/n$  entre 0 et 6 (étendue définie par les données de sondage).

On peut donc établir pour chaque variété de canne des abaques indiquant la précision selon différentes tailles d'échantillon  $\mathbf{n}$ .

## 2.2 Résultats

### 2.2.1 Valeur et intervalles de confiance de $k$

Voir [table 1](#). L'intervalle de confiance à 95% de  $k$  pour R 570 est disjoint de ceux des variétés R 577 et R 579. Les intervalles de confiance à 95% de R 577 et R 579 ne sont pas disjoints. Le paramètre  $k_{R570}$  serait donc distinct de celui des autres variétés alors que les  $k_{R577}$  et  $k_{R579}$  seraient confondus. Nous avons cherché à vérifier ces hypothèses.

Variété	$k$	$k_{inf}$	$k_{sup}$
R 570	0.8117	0.7376	0.8961
R 577	1.6743	1.3890	2.0540
R 579	1.8948	1.6252	2.2331

Tableau 1 – Estimation du paramètre d'agrégation  $k$  de la loi binomiale négative pour l'ENA et de son intervalle de confiance à 95%  $[k_{inf}; k_{sup}]$  par variété

### 2.2.2 Test de l'effet variété sur le paramètre $k$

On cherche s'il y a un effet de la variété sur le paramètre  $k$  de la distribution de *C. sacchariphagus*. Pour cela, on compare le modèle avec plusieurs paramètres  $k$  par variété ( $k_{var}$ ) et celui avec un unique  $k$  commun ( $k_c$ ) par un test du rapport de vraisemblance.

**Comparaison des modèles avec  $k_c$  commun aux trois variétés et avec  $k_{var}$  pour chaque variété** Le modèle avec effet variété sur l'agrégation de *C. sacchariphagus* s'ajuste mieux aux données que le modèle avec un paramètre  $k_c$  (D= 105.273, ddl=2, P<10<sup>-6</sup>). Il y a au moins une variété qui a un paramètre d'agrégation différent des autres.

**Calcul d'un paramètre d'agrégation commun à R 577 et R 579** D'après les intervalles de confiance à 95% (voir [tableau 1](#)), les paramètres  $k_{R577}$  et  $k_{R579}$  ne seraient pas distincts. On cherche à déterminer s'il y a un effet variété pour R 577 et R 579 en comparant un modèle avec deux  $k_{var}$  et un avec un paramètre commun  $k_c$  aux deux variétés.

Le test de rapport de vraisemblance montre qu'il n'y a pas de différence significative de coefficient d'agrégation entre R 577 et R 579 (D=0.934, ddl=1, P=0.33). Dans la suite de l'étude, nous avons donc conservé deux paramètres  $k$ , un pour la variété R 570 :  $k_{R570} = 0.8117$  et un paramètre commun aux variétés R 577 et R 579 :  $k_{R577/R579} = 1.8081$ .



**Effet mois sur l'agrégation** L'étude de l'effet mois au sein d'une même variété n'a pas permis de mettre en évidence un changement du paramètre  $k$  et donc de l'agrégation de *C. sacchariphagus* au cours des mois (voir les représentations graphiques des intervalles de confiance à 95% en annexe, figures 7 et 8).

**Conclusion** Nous avons donc identifié la loi de distribution de *C. sacchariphagus* à l'échelle d'une tige en estimant le paramètre d'agrégation  $k$  de la loi BN. Ce paramètre est commun aux variétés R 577 et R 579 mais est différent pour la variété R 570. La distribution de *C. sacchariphagus* suit donc deux lois BN selon la variété de canne :

$$\begin{aligned} \text{R 570} : \text{ENA} &\hookrightarrow \mathcal{BN}(0.81, \mu_p) \\ \text{R 577/579} : \text{ENA} &\hookrightarrow \mathcal{BN}(1.81, \mu_p) \end{aligned}$$

A partir de cette distribution, il est maintenant possible selon la variété de quantifier la précision du protocole d'échantillonnage afin d'en améliorer la performance.

### 2.2.3 Précision des estimations

La figure 2 montre les bornes  $\mu_{min}$  et  $\mu_{max}$  en fonction de la moyenne observée sur un chargement  $\mu_c$ . La vraie moyenne  $\mu_p$  est comprise entre ces bornes. Les intervalles de confiance exacts à 95% sont déterminés pour des tailles d'échantillon  $n$  allant de vingt à cent tiges.

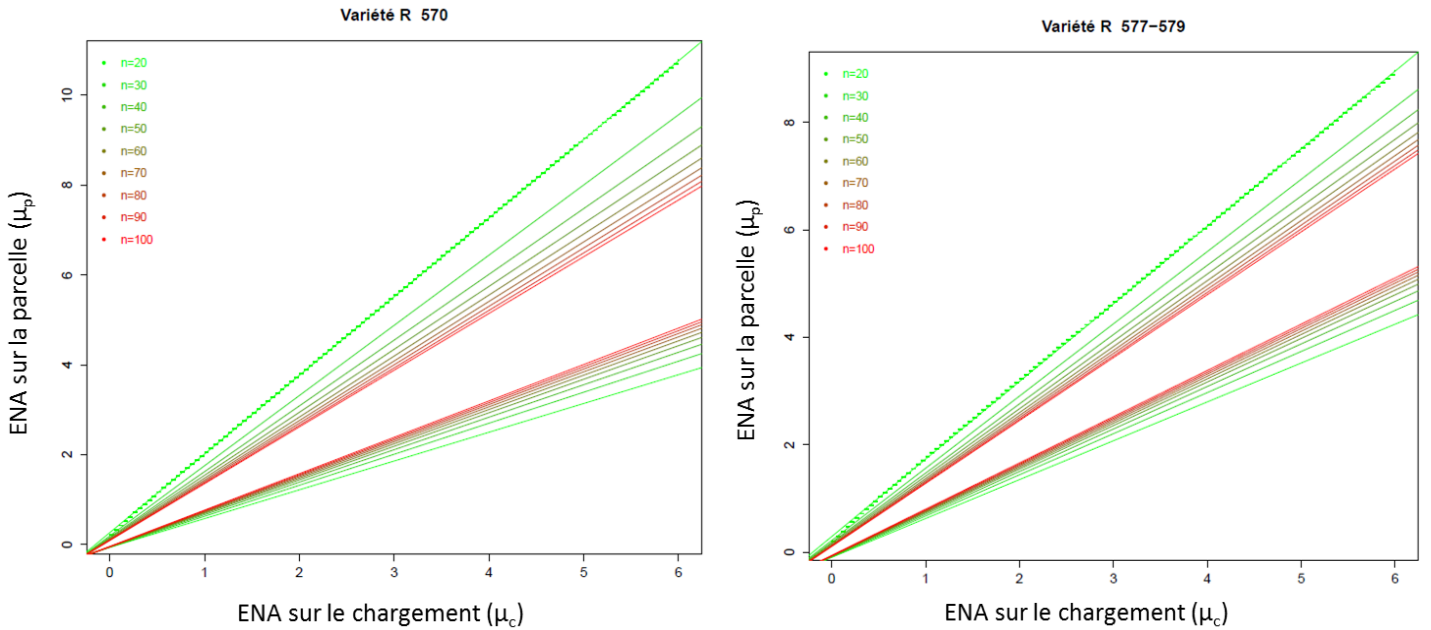


FIGURE 2 – Intervalles de confiance exacts à 95% de la moyenne  $\mu_p$  estimée pour une parcelle selon la taille  $n$  de l'échantillon et la moyenne  $\mu_c$  observée dans le chargement

Quelle que soit la variété, on gagne beaucoup en précision si on augmente le nombre de tiges échantillonnées jusqu'à 40 (jusqu'à 32% de précision en plus par rapport à 20 tiges), puis le gain de précision devient progressivement plus faible. Au delà de 50 tiges, le gain de précision apparaît faible (gain de précision maximal de 20% par rapport à 40 tiges). Avec 20 tiges, il est difficile de comparer avec certitude deux parcelles uniquement avec la moyenne observée  $\mu_c$  à cause de la taille des intervalles de confiance (allant jusqu'à une

imprécision de 7.25 ENA/tige). Ces abaques ont été réalisées avec la valeur de  $k$  maximisant la vraisemblance, mais on constate toutefois que si on fait varier la valeur de  $k$  au sein de son intervalle de confiance à 95%, les intervalles de confiance de  $\mu_p$  varient peu. L’incertitude sur la valeur de  $k$  influe peu sur le calcul de la précision de l’estimation de la moyenne  $\mu_p$  (voir en annexe figure 9).

### 3 Mise en évidence des liens entre dégâts et dommages

D’après Tammes (1961), les ravageurs provoquent de graves pertes économiques quand ils s’attaquent non seulement au rendement mais aussi à la qualité de la production. Or pour la canne à sucre, ce qui est important est la richesse en sucre de la production en plus de sa quantité. L’essentiel du revenu du producteur est le prix usine, c’est-à-dire le prix directement lié à la production de saccharose : il dépend de la quantité de biomasse de canne produite et de sa richesse en sucre (voir en annexe figure 10). La richesse en sucre (abrégée “richesse” par la suite) est un indicateur de la quantité de sucre cristallisable de la canne, il s’exprime en % dit “point” de richesse.

Nous avons cherché les fonctions de dommage entre dégâts et richesse d’une part et dégâts et rendement d’autre part.

#### 3.1 Fonction de dommage sur la richesse en sucre

##### 3.1.1 Matériel et méthode

**Données** Ces données proviennent du CTICS (Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre de la Réunion) et sont une estimation de la richesse en sucre d’une parcelle. Pour chaque chargement livré dans un centre de pesée, des sondages sont réalisés de façon aléatoire puis analysés en laboratoire selon un protocole réglementé pour déterminer sa richesse.

Les données traitées sont celles de l’année 2013. Pour chaque chargement, nous avons donc les résultats d’ENA sur 20 tiges ( $\mu_c$ , voir partie 2.1.1), la richesse du chargement, la variété de canne, le type de coupe (mécanique ou manuelle), le mois de coupe (en variable quantitative afin de limiter les déséquilibres de plan et pouvoir affecter des puissances à la variable) ainsi que le centre de livraison (indicateur géographique de la parcelle). Ces dernières variables sont intéressantes dans cette partie car la richesse en sucre des tiges peut évoluer au cours de la campagne et selon la région de l’île. Le jeu de données concerne 880 chargements (description des variables qualitatives voir annexe, tableau 8).

En se basant sur l’étude bibliographique de la partie 1, on étudie la relation linéaire entre les attaques et les dégâts sur la richesse en incluant les variables citées précédemment.

**Modèle complet** Le modèle complet s’écrit :

$$\text{richesse} = \text{mois} + \text{mois}^2 + \text{mois}^3 + \text{centre} + \text{variété} + \text{ENA} + \text{type de coupe} + \text{centre} \times \text{variété} + \text{centre} \times \text{mois} + \text{variété} \times \text{type de coupe} + \text{variété} \times \text{mois} + \text{ENA} \times \text{mois} + \text{ENA} \times \text{centre} + \text{ENA} \times \text{variété} + \text{ENA} \times \text{type de coupe} + \text{ENA} \times \text{mois}^2 + \text{ENA} \times \text{mois}^3$$

L’AIC du modèle est de **789.59**. Le modèle part du principe que la richesse évolue au cours de la campagne, avec la variété de canne, la région de culture (à cause des conditions environnementales) et le type de coupe. Les interactions sont celles dont on soupçonne l’effet à cause des caractéristiques de la canne et de l’île : certaines variétés sont adaptées à des régions de l’île, celles-ci peuvent être soumises au cours de la campagne



à des variations climatiques qui leur sont propres, certaines variétés sont des variétés de début ou de fin de campagne et il est possible qu’elles interagissent différemment avec le type de coupe. Toutes les interactions incluant la variable ENA sont également incluses dans le modèle car il s’agit de l’effet étudié.

**Choix du modèle** La sélection de variables se fait par régression linéaire pas-à-pas selon le critère de l’AIC en procédure *backward* et *forward* (*both*).

### 3.1.2 Résultats

Le modèle sélectionné est le suivant :

$$richesse = mois + mois^2 + centre + variété + ENA + type\ de\ coupe + mois \times centre + ENA \times type\ de\ coupe + type\ de\ coupe \times variété$$

L’AIC du modèle est maintenant de **762.48**. Les interactions avec la variable d’attaque ENA ne sont pas sélectionnées, sauf celle avec le type de coupe. En réalisant une ANOVA (fonction *Anova* {*car*}, Fox et Weisberg (2011)) de type II, on constate que cet effet n’est pas significatif. De plus, l’important déséquilibre des données concernant la variable “type de coupe” (voir annexe tableau 8) rend d’autant plus instable les résultats concernant cette interaction. Nous avons donc décidé de la retirer du modèle sélectionné. En réalisant à nouveau une ANOVA sur ce nouveau modèle, on constate que l’interaction variété  $\times$  type de coupe n’est pas significative (voir annexe tableau 9).

Le modèle final est donc le suivant :

$$richesse = mois + mois^2 + centre + variété + ENA + type\ de\ coupe + mois \times centre$$

L’AIC de ce modèle est **763.09**. Les effets sont tous significatifs au seuil de  $5.10^{-3}$  (voir annexe tableau 10). Vu le fort déséquilibre des données, il aurait été préférable de réaliser une ANOVA de type III. Cependant à cause du faible effectif de certains couples centre/ mois, cela n’a pas été possible. L’effet ENA est significatif et la perte de richesse est estimée à **0.21  $\pm$  0.07 points** pour 1 entre-noeud attaqué/tige, toutes choses égales par ailleurs.

## 3.2 Fonction de dommage sur la masse des tiges

Le rendement canne étant également à la base du revenu obtenu par un producteur, il est nécessaire de quantifier l’impact des attaques par *C. sacchariphagus* sur la biomasse de canne produite. On étudie donc le lien entre les dégâts et la masse de tiges à l’échelle individuelle, pour plusieurs tiges d’une même parcelle.

### 3.2.1 Matériel et méthode

**Données** Ces données sont issues de jeux de données étalés sur la période 1997-2003 et provenant de différentes sources (FDGDON, CIRAD, R. Goebel communication personnelle). Certaines de ces données sont issues d’expérimentations de tests de méthodes de lutte (chimique ou biologique). Dans ce cas, seules les données issues des parcelles témoins, non traitées, ont été utilisées dans nos analyses. On dispose pour chacune des parcelles de la masse individuelle de 120 à 497 tiges. Une “parcelle” correspond ici à un terrain soumis à un ensemble de conditions environnementales et agricoles qui lui sont propres (climat, composition du sol, parcelles voisines...). Pour cette partie, nous n’avons pu étudier que la variété R 579 à cause du manque de données pour les autres variétés. Le jeu de données utilisé est constitué de 6491 tiges issues de 32 parcelles et de quatre variables : ENA, ENT,

la masse de la tige (en kg) et une variable indiquant la parcelle d'appartenance de la tige.

**Modèle** La masse d'une tige de canne à sucre dépend de ENT. Selon les conditions agro-environnementales de la parcelle (pluviométrie, ensoleillement, richesse du sol...) lors de la croissance de la canne, un entre-noeud n'aura pas la même masse. Si la tige est attaquée et possède un entre-noeud attaqué, sa masse devrait être diminuée par rapport à sa masse "normale", sans attaque. De même que précédemment, on suppose que la perte due aux entre-noeuds attaqués dépend des conditions agro-environnementales, un même niveau de dégâts n'aura pas le même effet selon les parcelles. La modélisation de l'effet des conditions agro-environnementales est complexe car elle requiert de nombreuses données et doit prendre en compte de nombreux facteurs souvent liés entre eux. Par souci de simplification, nous avons donc considéré l'ensemble des conditions agro-environnementales d'une parcelle comme un effet aléatoire. Pour une variété donnée, on peut donc modéliser la masse d'une tige  $i$  venant de la parcelle  $j$  de la façon suivante :

$$masse_{i,j} \sim \alpha_j ENT_{i,j} + \beta_j ENA_{i,j}$$

Où

$$\alpha_j = A + a_j$$

$$\beta_j = B + b_j$$

A et B sont des constantes propres à la variété : ce sont respectivement la prise et la perte moyenne de masse de la tige. Selon les conditions agro-environnementales de la parcelle  $j$ , cette prise (ou perte) peut être modifiée, d'où l'ajout des coefficients  $\alpha_j$  et  $\beta_j$  qui représentent l'effet aléatoire que l'on nomme "parcelle".

D'après [Picard \(2006\)](#), l'effet d'une perforation d'un entre-noeud sur les caractéristiques d'une tige serait visible sur l'entre-noeud en question mais aussi sur les entre-noeuds situés au-dessus ou au-dessous du dégât. Il se pourrait donc qu'il y ait un effet non pas additif mais quadratique ou cubique d'un entre-noeud attaqué sur la masse d'une tige. De plus, les entre-noeuds situés à l'extrémité de la tige, les plus jeunes, sont en général moins développés et contribuent moins à la masse d'une tige que des entre-noeuds ayant leur taille définitive. Il est donc très probable qu'il y ait des effets non linéaires des variables ENT et ENA sur la masse d'une tige. Cependant, pour des raisons de non convergence d'algorithme en modèle mixte, il n'a pas été possible de tester ces effets et nous avons donc travaillé uniquement sur un modèle linéaire.

Le modèle étudié comprend les effets fixes ENT et ENA ainsi que les effets aléatoires liés à la parcelle. L'influence des conditions agro-environnementales sur la croissance des tiges se traduit par les effets aléatoires d'interaction ENT  $\times$  parcelle et ENA  $\times$  parcelle. Le modèle est le suivant :

$$masse = ENT + ENA + parcelle + parcelle \times ENT + parcelle \times ENA$$

**Test des effets** On utilise la fonction *lmer* du package `{lme4}` ([Bates et al., 2014](#)) pour ajuster le modèle mixte.

Le test des **effets aléatoires** se fait entre modèles emboîtés ([Bates, 2010](#)), à partir d'un test du rapport de vraisemblance. Sous l'hypothèse  $H_0 : \sigma_{aleatoire} = 0$ , la statistique de test suit une loi  $\chi^2_{ddl}$  avec comme ddl la différence du nombre de paramètres de chaque modèle, ici ddl = 1.

Le test des **effets fixes** n'étant pas possible avec la fonction *lmer* (pas de probabilités critiques fournies (Bolker et al., 2009)), on étudie leur significativité selon les intervalles de confiance à 95% des valeurs des coefficients fixes. Si 0 est compris dans l'intervalle, on considère l'effet comme non significatif. On calcule les intervalles de confiance à 95% par bootstrap sur modèle mixte en utilisant la fonction *bootMer* {lme4}.

**Principe de la fonction bootMer** La fonction *bootMer* du package {lme4} réalise un bootstrap sur modèle mixte. Cette méthode, robuste en présence d'outliers, nous permet d'obtenir les intervalles de confiance des effets fixes. Shang et Cavanaugh (2008) en expliquent le principe. Le modèle mixte s'écrit sous la forme :

$$Y = X\beta + Zb + \epsilon \quad (3)$$

avec Y la variable à expliquer (masse de la tige),  
X la matrice des effets fixes (ENT, ENA),  
 $\beta$  le vecteur des paramètres associés aux effets fixes,  
Z la matrice des effets aléatoires (parcelle, parcelle×ENT, parcelle×ENA),  
b le vecteur des paramètres associés aux effets aléatoires et  
 $\epsilon$  l'erreur résiduelle.

On suppose que  $b \hookrightarrow \mathcal{N}(0, D)$ , D étant la matrice des paramètres de variance et  $\epsilon \hookrightarrow \mathcal{N}(0, R\sigma^2)$ , R étant une matrice connue. On note  $\theta$  le vecteur des paramètres inconnus ( $\beta, D, \sigma^2$ ),  $L(\theta|Y^*)$  est la vraisemblance de l'équation (3) à partir de l'échantillon  $Y^*$  issu de bootstrap.  $\hat{\theta}^*$  est le vecteur de valeurs des paramètres d'après le maximum de vraisemblance à partir de l'échantillon de bootstrap  $Y^*$ ,  $\hat{\theta}$  est le même vecteur mais obtenu à partir de l'échantillon d'origine Y.

Etapas de réalisation du bootstrap avec W simulations :

1. On estime  $\hat{\theta}$  à partir de l'échantillon d'origine Y afin d'obtenir  $\hat{\beta}, \hat{D}$  et  $\hat{\sigma}^2$ ;
2. On génère le nouvel échantillon  $Y^*$  de même taille n que Y en utilisant le modèle suivant :

$$y_i^* = X_i\hat{\beta} + Z\hat{b}_i^* + \hat{\epsilon}_i^*$$

où  $\hat{b}_i^*$  et  $\hat{\epsilon}_i^*$  sont respectivement tirés de  $\mathcal{N}(0, \hat{D})$  et  $\mathcal{N}(0, R\hat{\sigma}^2)$ ,

3. On ajuste le modèle 3 aux données bootstrap  $Y^*$ , et l'on obtient ainsi les estimateurs  $\hat{\beta}^*, \hat{D}^*$  et  $\hat{\sigma}^2$ .
4. On répète les opérations 2 et 3 W fois.

Les estimations des effets fixes sont donc faites par maximum de vraisemblance. On obtient une distribution empirique de chaque paramètre.

**Différents types d'intervalles de confiance** Les intervalles de confiance sont ensuite calculés avec la fonction *boot.ci* {boot} (Canty & Ripley, 2013). Nous avons utilisé ceux se basant sur l'approximation normale, l'intervalle de bootstrap basique et l'intervalle percentile avec un niveau de confiance de 95%.

Normal : se base sur l'approximation normale avec  $\sigma$  l'estimateur de l'écart-type calculé à partir des W simulations (valable pour W grand).

$$IC_{normal} = \theta - 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{W}}; \theta + 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{W}}$$

Bootstrap basique : se base sur les quantiles empiriques de la distribution bootstrap du paramètre  $\theta$ .

$$IC_{basic} = 2\theta - \theta_{1-\frac{\alpha}{2}}^*; 2\theta - \theta_{\frac{\alpha}{2}}^*$$

Bootstrap percentile : se base directement sur les percentiles.

$$IC_{percentile} = \theta_{\frac{\alpha}{2}}^*; \theta_{1-\frac{\alpha}{2}}^*$$

Avec  $\theta$  la valeur du paramètre et  $\alpha$  l'erreur (ici, 5%).

### 3.2.2 Résultats

Le modèle étudié est ajusté par Restricted Maximum Likelihood (REML) qui permet d'obtenir des estimations non biaisées des variances des effets aléatoires (Bates, 2010).

**Valeurs et tests des effets fixes** Résultats voir tableau 2. En moyenne quelle que soit la parcelle, un entre-noeud en plus sur une tige apportera une masse de 0.084kg soit 84g et pour chaque entre-noeud attaqué, la tige perdra 32g. Les intervalles de confiance à 95% ne comprennent pas 0, les deux effets fixes ENT et ENA sont donc significatifs sur la masse de la tige.

Estimation		Normal		Basique		Percentile	
ENT	ENA	ENT	ENA	ENT	ENA	ENT	ENA
0.084	-0.032	0.075	-0.043	0.075	-0.043	0.074	-0.042
		0.092	-0.021	0.092	-0.022	0.093	-0.021

Tableau 2 – Estimation et intervalles de confiance à 95% des effets fixes de la fonction de dommage sur la masse d'une tige

**Valeurs et test des effets aléatoires ENT× parcelle et ENA×parcelle** Résultats voir en annexe tableau 11. Les deux effets aléatoires ENT×parcelle et ENA×parcelle sont très significatifs ( $P < 10^{-6}$ ). Pour l'effet ENA× parcelle, le coefficient aléatoire spécifique à chaque parcelle ajouté à la pente de l'effet fixe ENA est tiré dans une  $\mathcal{N}(0, \sigma = 0.029)$ . Ce dernier résultat valide le fait que les conditions agro-environnementales de la parcelle influent bien sur la fonction de dommage.

**Conclusion** On a pu estimer qu'en moyenne, 1 entre-noeud attaqué entraînait une perte de 32g de biomasse sur la tige. A ce coefficient s'ajoute le terme aléatoire dû à l'effet de la parcelle, soit un effet aléatoire ayant un écart-type de 29 g pour 1 entre-noeud attaqué. Vu la valeur importante de cette part aléatoire, on ne peut pas estimer précisément les pertes sur une parcelle soumise à des conditions environnementales particulières.

### 3.3 Application : simulation de dégâts et calcul des pertes associées à l'échelle de la zone cannière

Avec la distribution exacte de *C. sacchariphagus* sur l'année 2013 obtenue en partie 2.1.1 et les fonctions de dommage en partie 3, on peut simuler des attaques à l'échelle d'une parcelle entière sur différentes zones de l'île. On travaille par couple variété/région de l'île, les 3 variétés sont les mêmes que précédemment et les zones de l'île sont Ouest, Sud et Est. Les parcelles du Nord ont été regroupées dans la région Est de la même façon que dans le Bulletin de Santé du Végétal de Février 2014 (Chambre d'agriculture de la Réunion, 2014).

### 3.3.1 Matériel et méthode

Pour chaque variété, on simule 10 000 parcelles ayant une densité de 80000 tiges récoltables / ha. On simule pour chacune des tiges un ENA. On calcule ensuite les pertes totales dues à ces dégâts générés.

1. Simulation des parcelles : on simule pour chaque couple variété/région 10 000 parcelles en tirant 10 000 vraies moyennes d'attaque  $\mu_p$ .  
Pour cela, on détermine par couple variété/région, à partir des moyennes observées sur les chargements ( $\mu_c$ ), la distribution des vraies moyennes  $\mu_p$  en utilisant une loi Zero Inflated Binomial Negative (notée ZINB), voir détail de la procédure dans l'annexe page 31 "Génération d'ENA par parcelle ( $\mu_p$ )".
2. On injecte les 10 000  $\mu_p$  dans la BN de la partie 2.1.1 correspondante pour chaque variété, et on génère ainsi 80 000 tiges en tirant 80 000 ENA par parcelle.
3. Pour chaque ENA tiré, on peut calculer les pertes relatives associées en utilisant les fonctions de perte de la partie 3. La fonction de dommage sur la masse a été estimée pour la variété R 579, mais on applique quand même ce coefficient de dommage à R 570 et R 577 en première approche. Pour ces calculs, on se base sur une richesse de référence de 13.8 %. On n'utilise que la partie fixe de la fonction de dommage, car la partie aléatoire s'annule du fait du grand nombre de simulations (loi normale centrée).
4. Pour chaque parcelle simulée, on a donc la perte de richesse en sucre ainsi que la perte de rendement, ce qui nous permet de calculer les pertes économiques associées aux dégâts. On se base sur une parcelle de référence produisant 1200 tonnes pour 14 ha avec une richesse de 13.8%, soit bénéficiant de 39.09 €/t. Pour la parcelle de référence, la marge brute est de 3170 €/ha, comprenant le prix usine de 3351 €/ha et l'aide à la production de 1641 €/ha. Cette aide est proportionnelle à la production et dépend de la tranche de tonnage considérée (21.40 €/t pour les 700 premières tonnes, puis 16 €/t pour les 500 tonnes suivantes, etc...) (Canne progrès, 2008).

### 3.3.2 Résultats

On sépare les 10 000 parcelles générées en trois niveaux de dégâts : faible ( $\mu_p \leq 2$ ), moyen ( $2 < \mu_p \leq 4$ ) et fort ( $4 < \mu_p$ ). Pour chacun de ces niveaux, on calcule sa fréquence d'apparition pour chaque couple variété/région, ainsi que les pertes moyennes subies par les parcelles dans ces classes.

Couple région/variété	Sud 570	Est 570	Ouest 570	Ouest 577	Est 579	Ouest 579
Fréquence de parcelle (%)	99.44	99.57	94.36	92.62	98.62	77.06
Moyenne d'attaque (ENA)	0.2	0.1	0.6	0.7	0.1	0.8
Perte prix usine (€/ha)	-28	-13.6	-112.3	-125.4	-19.6	-135.8
Perte aide à la production (€/ha)	-15.1	-7.2	-64	-71.1	-10.6	-75.2
Perte marge brute (%)	1.4	0.7	5.6	6.2	1	6.7

Tableau 3 – Pertes économiques provoquées par les dégâts faibles ( $\mu_p \leq 2$ ) dans chaque région étudiée pour chaque variété (les modalités région  $\times$  variété non présentées correspondent à des combinaisons peu fréquentes dans notre jeu de données).

Couple région/variété	Sud 570	Est 570	Ouest 570	Ouest 577	Est 579	Ouest 579
Fréquence de parcelle (%)	0.55	0.35	5.3	6.96	1.08	18.59
Moyenne d'attaque (ENA)	2.5	2.8	2.6	2.6	2.8	2.8
Perte prix usine (€/ha)	-420.3	-472.5	-432.8	-449.8	-469.1	-466.1
Perte aide à la production (€/ha)	-256.4	-291.8	-262.2	-279.9	-287.4	-287.9
Perte marge brute (%)	21.4	24.1	21.9	23	23.9	23.8

Tableau 4 – Pertes économiques provoquées par les dégâts moyens ( $2 < \mu_p \leq 4$ ) dans chaque région étudiée pour chaque variété (les modalités région  $\times$  variété non présentées correspondent à des combinaisons peu fréquentes dans notre jeu de données).

Couple région/variété	Sud 570	Est 570	Ouest 570	Ouest 577	Est 579	Ouest 579
Fréquence de parcelle (%)	0.01	0.08	0.34	0.42	0.3	4.35
Moyenne d'attaque (ENA)	4.1	5.1	4.8	4.6	5.3	5.3
Perte prix usine (€/ha)	-673.9	-847.1	-749.3	-754.6	-884.8	-880.6
Perte aide à la production (€/ha)	-439.2	-594.2	-484.5	-506.5	-630.4	-625.4
Perte marge brute (%)	35.1	45.5	38.9	39.8	47.8	47.5

Tableau 5 – Pertes économiques provoquées par les dégâts forts ( $4 < \mu_p$ ) dans chaque région étudiée pour chaque variété (les modalités région  $\times$  variété non présentées correspondent à des combinaisons peu fréquentes dans notre jeu de données).

On constate que les dégâts faibles sont les plus fréquents et provoquent très peu de pertes économiques (au pire, une perte de marge brute de 6.7%). Les dégâts moyens sont plus fréquents que les dégâts forts mais concernent très peu de parcelles dans le Sud et l'Est (entre 0.35% et 1.08% des parcelles), toutes variétés confondues. Les problèmes se rencontrent surtout dans l'Ouest, plus particulièrement pour la variété R 579 pour laquelle près de 23% des parcelles ont une perte de marge brute d'au moins 24% et pouvant aller jusqu'à 48% pour 4.35% d'entre elles.

## 4 Effet de la structure du paysage sur les niveaux de dégâts

Nous avons vu précédemment qu'il existait des différences de niveau moyen de dégâts selon la région de l'île (voir partie 3.3.2), différences qui ne s'expliquent pas uniquement par l'effet variétal. Afin d'expliquer ce dernier résultat, nous avons cherché à identifier des facteurs environnementaux influençant les niveaux d'infestation afin de déterminer s'il est possible d'identifier des zones à risque. Pour cela, à partir de données géoréférencées de certaines parcelles, nous avons étudié leur structure du paysage de façon quantitative afin de la mettre en relation avec les dégâts observés.

### 4.1 Matériel et méthode

#### 4.1.1 Données

**Données de cartographie** Les données géoréférencées ont été obtenues par un protocole complémentaire aux comptages faits par Tereos (voir partie 2.1.1). Pour certains chargements, lorsque les comptages d'entre-noeuds attaqués sur les vingt tiges indiquaient une parcelle très attaquée (aux dires de l'observateur), les coordonnées GPS de celle-ci étaient relevées : 48 parcelles ont été géoréférencées (voir carte en annexe, figure 11) . A l'aide du logiciel ArcGIS et de différentes couches issues de la DAAF, de l'équipe Artists du CIRAD et de l'IGN, nous avons pu calculer différents indices de la composition et de la structure du paysage aux alentours de chaque parcelle étudiée. Les couches d'information dont nous disposons sont : la base d'occupation du sol en termes de cultures (canne, prairie



ou autres), les zones de végétation arborée (forêts, ravines), les routes et les bâtiments. Nous avons également pour chaque parcelle son altitude ainsi que plusieurs variables utilisées dans les parties précédentes : variété de canne cultivée et région de localisation de la parcelle (description des variables qualitatives voir annexe, tableau 12).

En l'absence de données sur les capacités de vol de *C. sacchariphagus*, nous nous sommes appuyés sur des données disponibles pour d'autres espèces de la famille des Crambidae qui indiquent une capacité de dispersion de 100 à 200 m (Mazzi & Dorn, 2012). Par sécurité, nous avons considéré une zone tampon plus étendue et avons fixé sa taille à 500 m de rayon (voir exemples figure 3). Nous avons défini comme habitat les types de surface suivants : canne à sucre, prairie, autres cultures, végétation arborée (forêts et ravines), végétation spontanée (zones de végétation différentes des précédentes), bâti (routes et bâtiments). On appelle polygone une entité géométrique ne contenant qu'un seul habitat. Dans chaque zone tampon, nous avons déterminé les polygones de chaque habitat. Pour chaque polygone, le périmètre, la surface et la distance à la parcelle étudiée vont être utilisés dans la suite de l'étude. La proportion surfacique de chaque habitat dans la zone tampon est également utilisée.

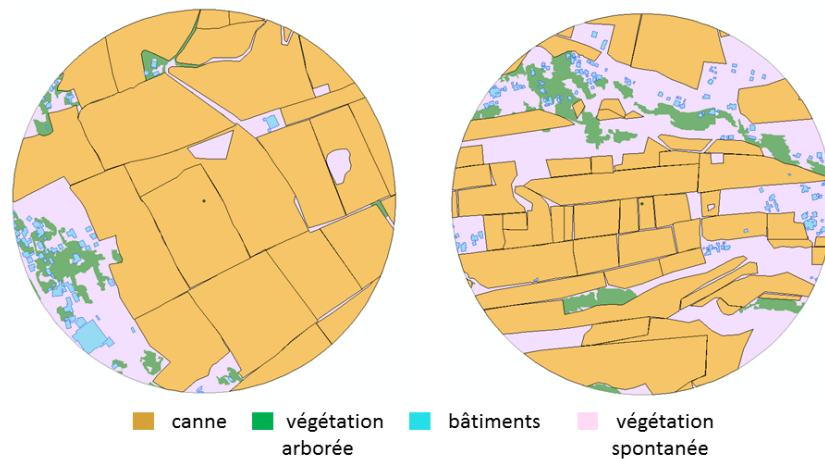


FIGURE 3 – Exemples de zones tampon obtenues à l'aide de données géoréférencées (paysage peu fragmenté à gauche, fragmenté à droite)

**Indices calculés** A partir des données ainsi extraites des zones tampon, nous avons calculé plusieurs indices de mesure de la fragmentation du paysage et de la connectivité de l'habitat de *C. sacchariphagus*.

Les indices de fragmentation sont la densité d'habitat (le nombre de polygones, tous habitats confondus, par unité de surface), la densité de bord (la longueur de bordure, tous habitats confondus, par unité de surface) et le ratio périmètre/surface canne (la longueur des bordures de canne par surface de canne, noté RPS canne). Ils quantifient le morcellement du paysage (spécifiquement de l'habitat canne pour RPS canne) en prenant en compte la taille des polygones ou leur nombre.

Les indices de connectivité sont ceux de Hanski (Hanski, 1999 dans Inclán et al. (2014)) et l'indice C de Winfree et al. (2005). Leur calcul consiste à pondérer les surfaces de canne par leur éloignement à la parcelle étudiée (détail des indices en annexe, page 32 "Calcul des indices de connectivité d'Hanski et C"). Ils sont calculés uniquement pour l'habitat de *C. sacchariphagus*, la canne à sucre. Plus ces indices sont élevés, plus la connectivité est importante : l'habitat de *C. sacchariphagus* est continu, ce qui pourrait faciliter ces déplacements d'un habitat à un autre et notamment faciliter la recolonisation des parcelles après la coupe.

On a donc pour chaque parcelle plusieurs indices de structure du paysage que l'on peut relier aux données de comptages de *C. sacchariphagus* de la partie 2.1.1.

Au vu du grand déséquilibre des données, nous n'avons pas pu tester les effets possibles des variables variété et région, même si nous avons vu dans les deux premières parties que les effets variété et région étaient des facteurs importants dans l'infestation par *C. sacchariphagus*. Pour chaque parcelle, on dispose d'ENA sur les vingt tiges aléatoirement échantillonnées : nous les avons sommés (variable notée SENA par la suite).

#### 4.1.2 ACP sur les variables de structure du paysage

On réalise deux ACP normées avec la fonction `PCA{ FactoMineR }` (Husson et al., 2013). La première ACP est faite sur les variables de proportion surfacique de chaque habitat (culture canne, culture autre, prairie, végétation arborée, végétation spontanée et bâti). Les indices de connectivité (Hanski, C) et de fragmentation (densité d'habitat, densité de bord et RPS canne) sont projetés en tant que variables supplémentaires, ainsi que la variable SENA. La deuxième ACP est faite sur les indices de connectivité et de fragmentation, et la variable SENA est projetée en tant que variable supplémentaire.

#### 4.1.3 Modèle linéaire généralisé de l'effet des différents indices sur les dégâts

Le modèle permettant de tester l'effet des indices de structure du paysage sur les attaques est un modèle linéaire généralisé avec une famille de Poisson surdispersé et une fonction de lien logarithmique. Les effets sont testés par ANOVA (fonction `anova.glm{base}`) de type III avec un test de Fisher. On utilise une famille Poisson surdispersé car la variance estimée est supérieure à la variance théorique.

### 4.2 Résultats

#### 4.2.1 ACP sur les variables de structure du paysage

Pour chaque parcelle sont calculés plusieurs indices de structure du paysage. L'ACP montre que ces indices sont liés entre eux et dépendent de la composition de la zone tampon (voir figure 4). La surface canne est anticorrélée avec les surfaces de végétation spontanée et de bâtis. La fragmentation du paysage est liée aux surfaces de végétation spontanée et de bâtis. Le lien entre surface de végétation spontanée et bâti est logique car la végétation spontanée correspond à la végétation autour des bâtiments. La végétation arborée n'est ni liée à la surface en canne ni aux bâtiments car elle comprend entre autres les ravines qui sont des espaces non cultivables et non constructibles. Il est difficile à partir de la seule ACP sur les indices (voir figure 5) de déduire les éventuels effets de la structure du paysage sur les attaques à cause de la mauvaise projection de la variable SENA sur le premier plan factoriel.



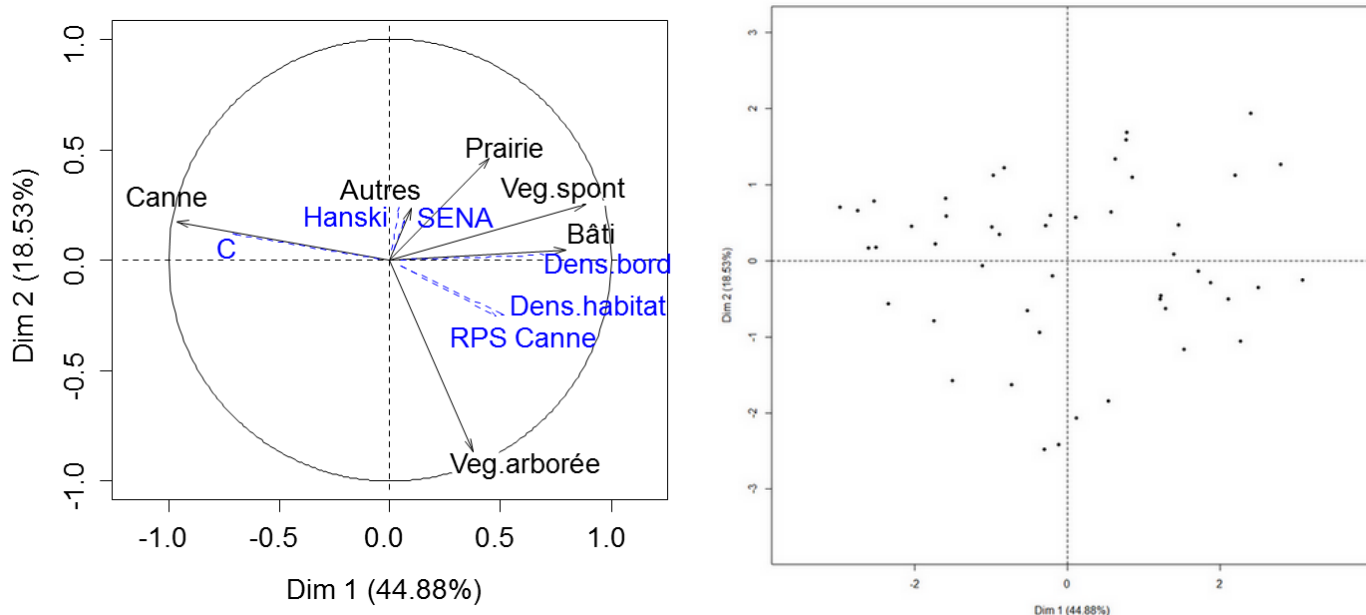


FIGURE 4 – 1<sup>e</sup> plan factoriel de l'ACP normée sur les proportions surfaciques et projection des variables SENA, Hanski, densité de bord, densité d'habitat et RPS canne en supplémentaire. A gauche, les variables, à droite, les individus

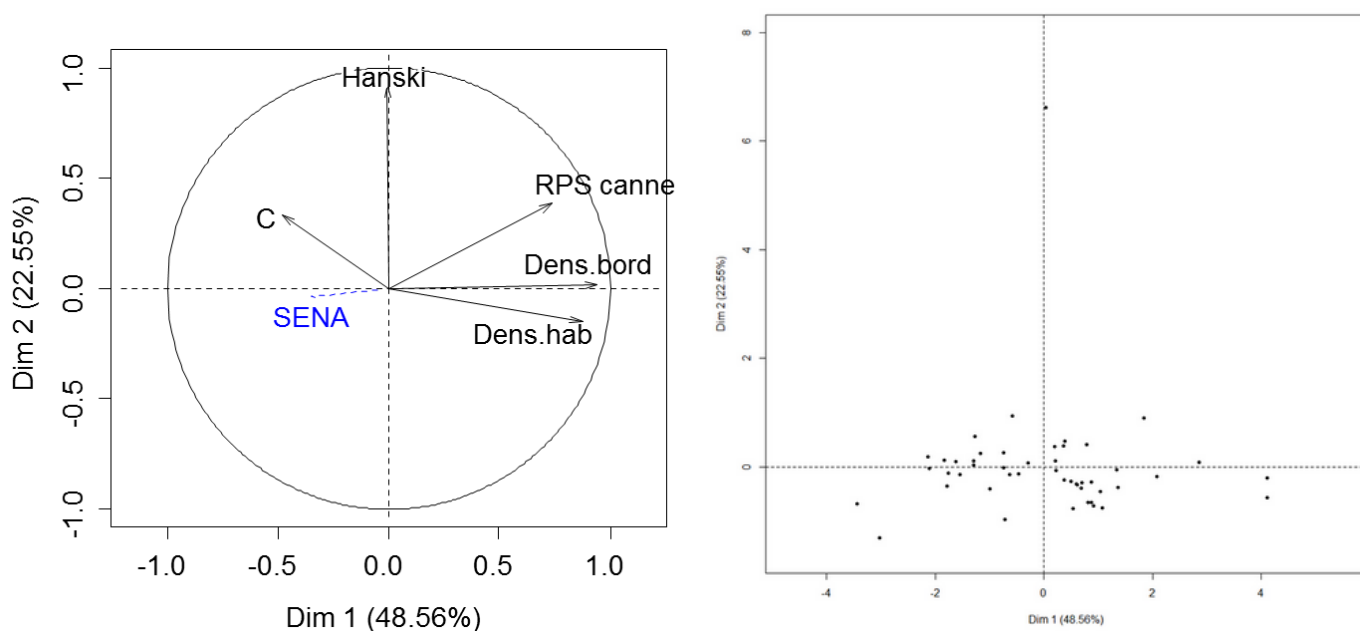


FIGURE 5 – 1<sup>e</sup> plan factoriel de l'ACP normée sur les indices de fragmentation et de connectivité et projection de la variable SENA en supplémentaire. A gauche, les variables, à droite, les individus

#### 4.2.2 Modèle linéaire généralisé de l'effet des différents indices sur les dégâts

**Effet des proportions surfaciques des types d'habitat sur les dégâts** Un modèle linéaire généralisé de l'effet de l'ensemble des proportions surfaciques (canne, autres cultures, prairies, végétation arborée, bâti et végétation spontanée) a permis de mettre en évidence un effet négatif significatif de la proportion de surface arborée ( $P = 0.0224$ ).

Les autres proportions surfaciques n'ont pas d'effet significatif sur les dégâts ( $P \geq 0.57$ ). L'intensité des dégâts diminue donc avec une plus grande proportion de surface arborée dans la zone tampon autour de la parcelle étudiée.

**Effet des indices de structure du paysage sur les dégâts** L'ACP sur les indices a montré qu'ils différencient les parcelles de la même façon (voir figure 5), nous avons donc étudié l'effet de ces indices séparément (voir résultat tableau 6). A l'échelle du paysage considéré dans son ensemble, les deux variables de fragmentation du paysage (densité d'habitat et densité de bord) ont un effet négatif significatif ( $P=0.0055$  et  $P=0.0057$ ). Si l'on considère uniquement la structuration du parcellaire de canne à sucre, la fragmentation a également un effet négatif significatif (pour la variable RPS canne, qui traduit le morcellement des parcelles de canne,  $P=0.0323$ ). En revanche, la connectivité entre parcelles de canne n'a pas d'effet significatif ( $P \geq 0.5885$ ) avec les deux indices utilisés (Hanski et C).

Echelle	Type d'indice	Variable	Estimation	Ecart-type	Pr(>F)
Paysage global	Fragmentation	Densité d'habitat	-0.160	0.0600	0.0055
Paysage global		Densité de bord	-0.001	0.0006	0.0323
Canne		RPS canne	-0.003	0.0011	0.0057
Canne	Connectivité	Hanski	-	-	0.5885
Canne		C	-	-	0.5696

Tableau 6 – Estimation et test de l'effet des indices de structure du paysage sur SENA dans le modèle linéaire généralisé avec une famille Poisson Surdispersé et une fonction de lien logarithmique

On peut donc supposer que l'effet de la fragmentation sur les attaques est du à la multiplication des bordures plutôt qu'à une réduction de connectivité de l'habitat de *C. sacchariphagus*. Les bordures et les surfaces de végétation arborée auraient donc un effet négatif sur *C. sacchariphagus*, ce qui correspondrait à ce qui a été vu dans l'étude bibliographique : les habitats non cultivés représentent des habitats propices aux populations d'ennemis naturels. Il y aurait donc un effet indirect de la fragmentation et des surfaces de végétation arborée sur les populations de *C. sacchariphagus* par le biais de la multiplication de ses ennemis naturels.

## 5 Discussion et perspectives

### 5.1 Résultats obtenus

#### 5.1.1 Précision du protocole d'échantillonnage

L'ajustement de la répartition de *C. sacchariphagus* à l'échelle de la tige à la loi binomiale négative a permis de montrer que le paramètre d'agrégation  $k$  dépend de la variété de la canne : l'agrégation est plus importante pour la variété R 570 que pour les variétés R 577/ R 579.

La précision de l'estimation de  $\mu_p$  peut être considérablement améliorée (jusqu'à un gain de 32% de précision) en doublant la taille de l'échantillon de 20 à 40 tiges. Avec le protocole actuel, il est difficile de comparer deux parcelles à partir de leurs valeurs  $\mu_c$ , mais lorsque l'on utilise ces valeurs pour comparer un ensemble de parcelles, l'imprécision de l'estimation diminue avec le nombre de parcelles étudiées. Sur une population de 200 parcelles, que l'on échantillonne 20 ou 40 tiges, la différence entre la valeur moyenne des dégâts sur la parcelle  $\mu_p$  et la valeur calculée sur l'échantillon  $\mu_c$  est faible (en moyenne, -0.002 avec 20 tiges et 0.001 avec 40 tiges (voir annexe tableau 13)).

### 5.1.2 Relations dégâts/dommages

Les attaques de *C. sacchariphagus* ont bien des conséquences significatives sur la richesse et la masse de la canne que l'on a pu quantifier. Les dommages ayant un impact économique se trouvent surtout pour la variété R 579, dont la sensibilité est connue, dans l'Ouest. Les pertes les plus élevées peuvent ainsi dépasser 45% de la marge brute pour 4.35% des parcelles de la zone Ouest.

### 5.1.3 Analyse de la structure du paysage

Ce travail préliminaire nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques du paysage influençant les attaques par *C. sacchariphagus*. La proportion de végétation naturelle arborée, la fragmentation du paysage et la fragmentation du parcellaire de canne à sucre ont un effet négatif sur les dégâts. Or la connectivité des parcelles de canne n'a pas d'influence sur les dégâts : l'effet de la fragmentation serait un effet indirect, favorisant la régulation biologique en augmentant les surfaces d'habitat hébergeant des ennemis naturels et les surfaces d'échange entre ces habitats et les parcelles de canne (bordures de champ). En revanche, il ne semble pas exister d'effet direct par fragmentation des parcelles de canne qui conduirait à des difficultés pour le ravageur à recoloniser les parcelles après la coupe.

## 5.2 Limites et perspectives

Cette étude constitue un travail préliminaire et une approche méthodologique des différents jeux de données et des problématiques d'intérêts concernant *C. sacchariphagus*. Elle doit servir à initier des études complémentaires avec des protocoles améliorés.

### 5.2.1 Précision du protocole d'échantillonnage

Seules les données de l'année 2013 ont été analysées. Bien que le jeu de données soit conséquent (990 parcelles), les résultats ne concernent que l'état des lieux des attaques sur cette année. Il serait intéressant de poursuivre les analyses en incluant les données qui seront récoltées en 2014. Le déséquilibre des données concernant les variétés et centres peut poser problème pour la stabilité des résultats. Ce déséquilibre représente la situation de la culture de la canne sur l'île : la variété R 570 est présente dans toutes les régions, alors que les variétés R 577 et R 579 sont cultivées dans des zones particulières (zones en altitude, humides...). Les effets d'interaction sont donc difficilement quantifiables et estimables. Enfin, il existe un biais important pour les cannes venant de l'Est. Dans cette région, il existe deux types de cannes : les cannes longues (récoltées entières) et les cannes tronçonnées (récoltées découpées en tronçons). Ces dernières n'ont pas été échantillonnées car le tronçonnage empêche de compter les dégâts, or elles représentent une proportion importante (aux environs de 30%) des cannes de la région.

### 5.2.2 Relations dégâts/dommages

Le problème du déséquilibre des données n'a pas permis de réaliser des modèles complexes incluant tous les effets (effet quadratique ou cubique pour la modélisation de la masse d'une tige, effet variété et interactions pour les analyses de structure du paysage). La fonction de dommage sur la masse n'a pu être modélisée que pour R 579 par manque de données. La variété R 570 étant résistante, il aurait été intéressant d'étudier l'effet des dégâts sur cette variété. Les fonctions de dommage auraient pu être également estimées sur les autres caractéristiques technologiques de la canne (taux de fibre, pureté du sucre...), mais par souci de simplification et d'intérêt cela n'a pas été abordé en détail.

### 5.2.3 Analyse de la structure du paysage

L'analyse des données géoréférencées a été limitée par le nombre de données disponibles (48 parcelles) et la qualité de celles-ci (parcelles très proches les unes des autres, répartition non uniforme sur l'ensemble de l'île, choix de parcelles considérées à tort comme très attaquées par l'observateur). De plus, l'extraction des données cartographiées sous ArcGIS à partir de plusieurs couches non concordantes entre elles a induit des biais dans les données (superposition des couches et donc surestimation du nombre de polygones et des périmètres par habitat dans les zones tampon). Par souci de simplification, le traitement des données de périmètre des habitats a été fait soit pour tous les habitats soit pour la canne seule, mais nous n'avons pas distingué les différents types de lisières : il aurait été intéressant de séparer les lisières comprenant des bâtiments des lisières habitables par les insectes. Par manque de données, l'effet variétal n'a pas pu être pris en compte dans les analyses alors qu'il s'agit d'une variable dont on connaît l'effet sur les populations de *C. sacchariphagus*. Les distances de dispersion de l'insecte et le rayon de la zone tampon ont été choisis d'après l'étude bibliographique, mais peu d'études ont été réalisées sur ces paramètres dont les valeurs sont à vérifier en faisant varier la surface de la zone tampon.

## Conclusion générale

Cette étude a permis d'apporter des connaissances sur le foreur ponctué de la canne à sucre, *C. sacchariphagus*, et son infestation à l'île de la Réunion. Elle a permis de mettre en évidence la répartition de l'insecte, son effet sur la canne à sucre ainsi que les facteurs pouvant favoriser les attaques. Elle constitue la première analyse du protocole d'épidémiologie récemment mise en place et a permis de poser les bases et la méthodologie d'analyse des données. Ce travail est donc à poursuivre et pourra être complété dans la durée afin de servir de référence sur l'état de l'infestation à la Réunion, notamment par des études géoréférencées pouvant permettre à terme de détecter plus précisément les lieux sensibles à *C. sacchariphagus* et de cibler les méthodes de lutte actuellement en étude.

## Références

- Ali, A., Gu, W., & Lobinske, R. (1998). Spatial distribution of Chironomid Larvae (Diptera : Chironomidae) in Two Central Florida Lakes. *Environmental entomology*, 27(4), 941–948.
- Aubertot, J., Barbier, J., Carpentier, A., Gril, J., Guichard, L., Lucas, et al. (2005). *Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux, synthèse du rapport d'expertise*, (Rapport technique).
- Badenhausser, I. (1989). Echantillonnage séquentiel et répartition spatiale des insectes : fondements méthodologiques et applications au cas du puceron du pois. *Acta oecologica. Oecologia applicata*, 10(1), 81 – 97.
- Bates, D. (2010). *lme4 : Mixed-effects modeling with R*.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). *lme4 : Linear mixed-effects models using eigen and s4*. (R package version 1.1-7)
- Bianchi, F. J. J., Booij, C. J. H., & Tscharntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes : a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, 273(1595), 1715–27.
- Binns, M. R., Nyrop, J. P., & Van der Werf, W. (2000). *Sampling and Monitoring in Crop Protection : The Theoretical Basis for Developing Practical Decision Guides*. CABI Publishing.
- Bliss, C. I., & Fisher, R. A. (1953). Fitting the negative binomial distribution to biological data. *Biometrics*, 9(2), 176–200.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J.-S. S. (2009). Generalized linear mixed models : a practical guide for ecology and evolution. *Trends in ecology & evolution*, 24(3), 127–35.
- Canne progrès. (2008). L'argent de la canne. *Cahier technique la canne*, 15.
- Canty, A., & Ripley, B. D. (2013). *boot : Bootstrap r (s-plus) functions*. (R package version 1.3-9)
- Chambre d'agriculture de la Réunion. (2014). *Bulletin de santé du végétal - Canne à sucre Février 2014* (Rapport technique).
- Côte, F., Chabrier, C., Domergue, R., Fouré, E., Fournier, P., Galan, et al. (2011). *Pesticides DOM : inventaire des dispositifs expérimentaux* (Rapport technique). Montpellier, France : Cirad, Inra, DAAF Guyane, Ministère de l'Agriculture et Onema eds.
- DAAF 974. (2013). *La filière canne à sucre à la Réunion*. Consulté le 04/07/14, sur <http://www.daf974.agriculture.gouv.fr/Canne-a-sucre>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2011). *Car, an R companion to applied regression* (Second éd.). Thousand Oaks CA : Sage.
- Goebel, F. R. (1999). Caractéristiques biotiques du foreur de la canne à sucre chilo sacchariphagus (Bojer, 1856) (lepidoptera : pyralidae) à l'île de la réunion. facteurs de régulation de ses populations et conséquences pour la lutte contre ce ravageur (Thèse de doctorat, Université de Toulouse III).
- Goebel, F. R., Achadian, E., & Mcguire, P. (2013). Economie impact of sugarcane moth borers in Indonesia. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, 28, 1–10.
- Goebel, F. R., Fernandez, E., Tibère, R., & Alauzet, C. (1999). Dégâts et pertes de rendement sur la canne à sucre dus au foreur Chilo sacchariphagus (Bojer) à l'île de la Réunion (Lep. : pyralidae). *Annales de la Société entomologique de France*, 35, 476–481.
- Goebel, F. R., & Way, M. J. (2003). Investigation of the impact of Eldana Saccharina (Lepidoptera : Pyralidae) on sugarcane yield in field trials in Zululand. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 77, 256–265.

- Goebel, F. R., Way, M. J., & Gossard, C. (2005). The status of *Eldana saccharina* (Lepidoptera : Pyralidae) in the South African sugar industry based on regular survey data. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 79(2005), 337.
- Gozé, E., Nibouche, S., & Deguine, J. (2003). Spatial and Probability Distribution of *Helicoverpa armigera* ( Hubner ) ( Lepidoptera : Noctuidae ) in Cotton : Systematic Sampling , Exact Confidence Intervals and Sequential Test Spatial and Probability Distribution of *Helicoverpa armigera* ( Hubner ). *Environmental entomology*, 32(5), 1203–1210.
- Husson, F., Josse, J., Lê, S., & Mazet, J. (2013). *Factominer : Multivariate exploratory data analysis and data mining with r*. (R package version 1.25)
- Inclán, D. J., Cerretti, P., & Marini, L. (2014, avril). Interactive effects of area and connectivity on the diversity of tachinid parasitoids in highly fragmented landscapes. *Landscape Ecology*, 29(5), 879–889. doi: 10.1007/s10980-014-0024-0
- Jeuffrault, E., Rolet, A., Reynaud, B., Manikom, R., Georger, S., Taye, T., et al. (2004). Vingt ans de lutte contre le ver blanc de la canne à sucre à la Réunion. Un succès, mais il reste des questionnements scientifiques pour confirmer la durabilité de la lutte biologique. *Phytoma - La défense des végétaux*, 675, 16–19.
- Launais, M., Bedranga, L., Estorgues, V., Faloya, V., Jeannequin, B., Lheureux, S., et al. (2014). *Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques*.
- Legaspi, J., Legaspi, B., Irvine, J., Johnson, J., Meagher, R., & Rozeff, N. (1999). Stalk-borer Damage on Yield and Quality of Sugarcane in Lower Rio Grande Valley of Texas. *Journal of Economic Entomology*, 92(1), 228–234.
- Mazzi, D., & Dorn, S. (2012). Movement of insect pests in agricultural landscapes. *Annals of Applied Biology*, 160, 97–113. doi: 10.1111/j.1744-7348.2012.00533.x
- Nibouche, S., & Tibère, R. (2008). Damage assessment for selection of resistance to the spotted stalk borer and genetic correlations for resistance and yield components in sugarcane. *Plant breeding*, 127(1), 38–42.
- Nibouche, S., & Tibère, R. (2010, juin). Mechanism of resistance to the spotted stalk borer, *Chilo sacchariphagus*, in the sugarcane cultivar R570. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 135(3), 308–314.
- Nibouche, S., Tibère, R., & Costet, L. (2012). The use of *Erianthus arundinaceus* as a trap crop for the stem borer *Chilo sacchariphagus* reduces yield losses in sugarcane : Preliminary results. *Crop Protection*, 42, 10–15.
- Nutter, F. W., Teng, P., & Royer, M. H. (1993). Terms and Concepts for Yield, Crop Loss, and Disease Thresholds. *Plant Disease*, 77, 211–215.
- Pedigo, L. P., Hutchins, S. H., & Higley, L. G. (1986). Economic Injury Levels in Theory and Practice. *Annual Review of Entomology*, 31(1), 341–368.
- Picard, C. (2006). *Approche écophysiologique des interactions entre la Canne à sucre et le Foreur ponctué (Chilo sacchariphagus)*.
- R Core Team. (2013). *R : A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria.
- Rajabalee, A., Lim Shin Chong, L., & Ganeshan, S. (1990). Estimation of sugar loss due to infestation by the stem borer, *Chilo sacchariphagus*, in Mauritius. In *Proceedings of the south african sugar technologists' association*.
- Rochat, J., Goebel, F. R., Tabone, E., Bègue, J. M., Fernandez, E., Tibère, et al. (2001). Integrated control of the sugarcane spotted stalk borer *Chilo sacchariphagus* (Lep : Pyralidae) in Reunion Island. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 75, 253–254.
- Shang, J., & Cavanaugh, J. E. (2008). An Assumption for the Development of the Akaike information criterion in mixed models. *Statistics & Probability Letters*, 78, 1422–1429.
- Soti, V. (2013). *Outils et méthodes d'écologie du paysage au service de la gestion des ravageurs des cultures (présentation)*.

- Soula, B., Karimjee, H., Goebel, F. R., Caplong, P., & Tabone, E. (2003). Lutte biologique contre le foreur de la canne à sucre à l'aide de trichogrammes : résultats d'essais au champ à la Réunion. *Phytoma - La défense des végétaux*, 562, 32–35.
- Syndicat du sucre de la Réunion. (2014). *La lettre sucre n.32* (Rapport technique).
- Tammes, P. (1961). Studies of yield losses II. Injury as a limiting factor of yield. *T. Pl.-ziekten*, 67, 257–263.
- White, W., Viator, R., Dufrene, E., Dalley, C., Richard, E., & Tew, T. (2008). Re-evaluation of sugarcane borer (Lepidoptera : Crambidae) bioeconomics in Louisiana. *Crop Protection*, 27(9), 1256–1261.
- Winfree, R., Dushoff, J., Crone, E. E., Schultz, C. B., Budny, R. V., Williams, N. M., & Kremen, C. (2005). Testing Simple Indices of Habitat Proximity. *The american naturalist*, 165(6).
- Yee, T. W. (2010). The VGAM package for categorical data analysis. *Journal of Statistical Software*, 32(10), 1–34.

# Annexes

Centre	Variété	Type de coupe	Mois
baril : 500	570 :11160	Inconnu : 20	juillet :1720
beaufonds : 280	577 : 3540	CL :19020	août :4420
boisrouge :1560	579 : 5100	CLM : 760	septembre :4540
casernes :1260			octobre :4560
gol :1540			novembre :4040
gdbois :1180			décembre : 520
gdpourpier :3640			
lamare : 440			
langevin : 980			
pentesassy : 420			
ravineglis : 320			
stella :3980			
tamarins :3700			

Tableau 7 – Nombre de tiges par modalité de chaque variable qualitative des données de sondage. CL= canne longue (coupée mécaniquement), CLM= canne longue coupée à la main

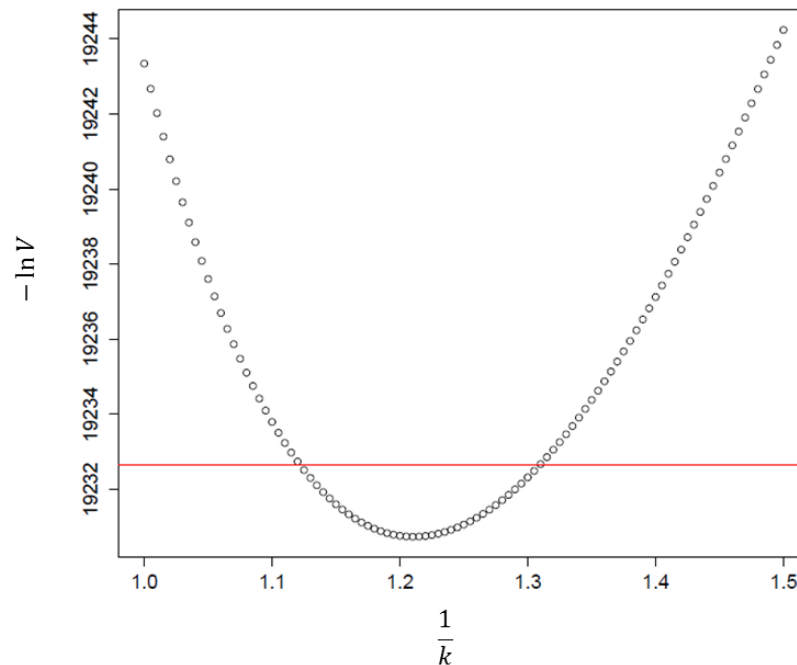


FIGURE 6 – Valeur de l’opposé du logarithme de la vraisemblance en fonction de la valeur du paramètre  $\frac{1}{k}$  et représentation de son intervalle de confiance à 95%, exemple pour la variété R 570



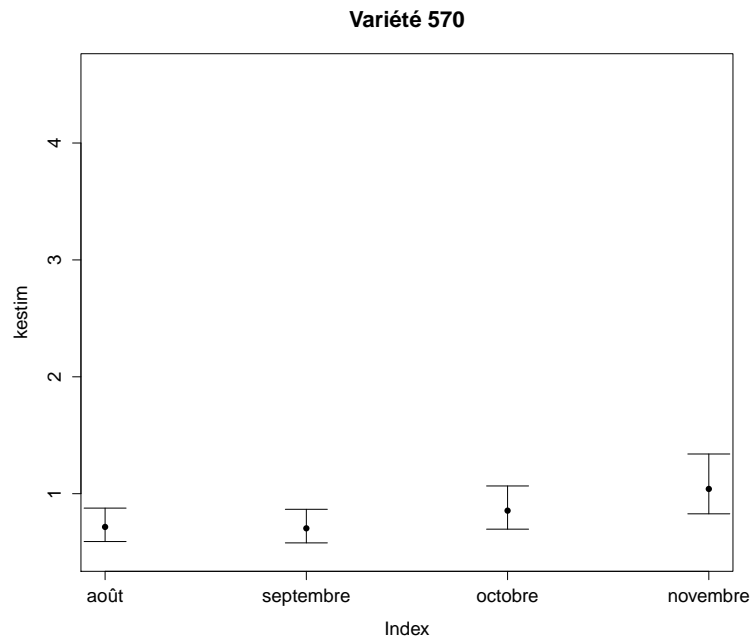


FIGURE 7 – Valeur moyenne et intervalle de confiance à 95% des paramètres  $k$  par mois de récolte pour la variété R 570

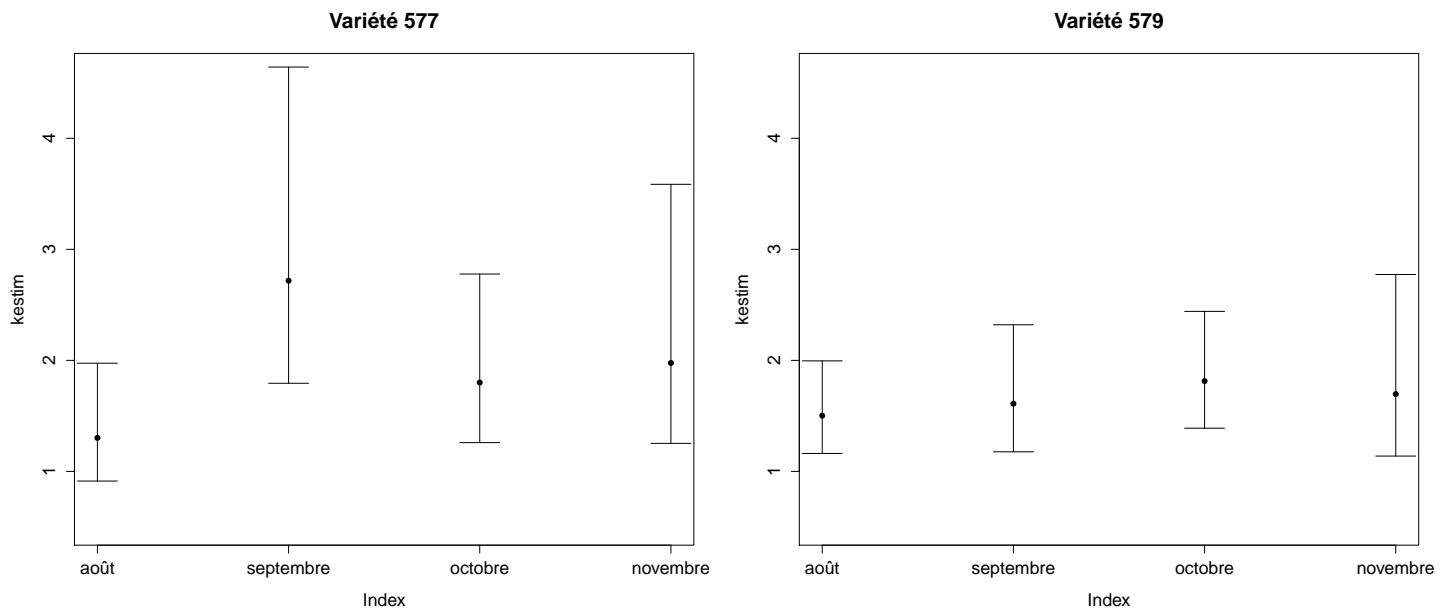


FIGURE 8 – Valeur moyenne et intervalle de confiance à 95% des paramètres  $k$  par mois de récolte pour les variétés R 577 (à gauche) et R 579 (à droite)

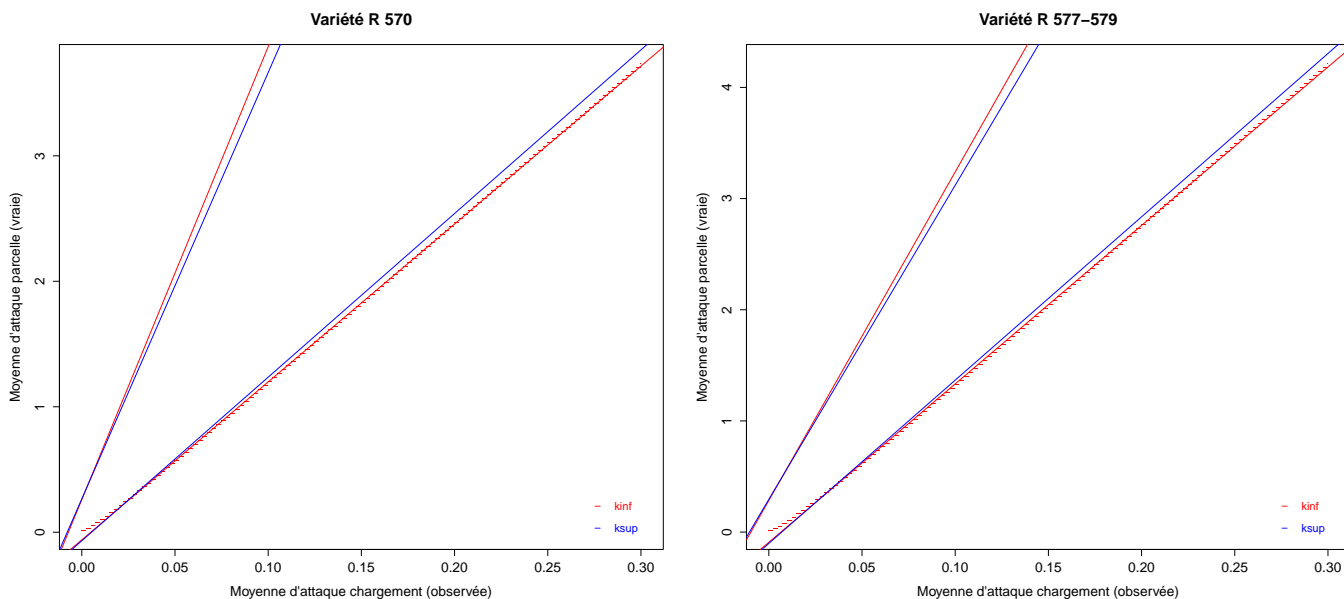


FIGURE 9 – Intervalles de confiance à 95% de ENA moyen sur la parcelle ( $\mu_p$ ) selon ENA moyen sur le chargement ( $\mu_c$ ) et selon la valeur estimée de  $k$  pour la variété R 570 (à gauche) et les variétés R 577/579 (à droite)

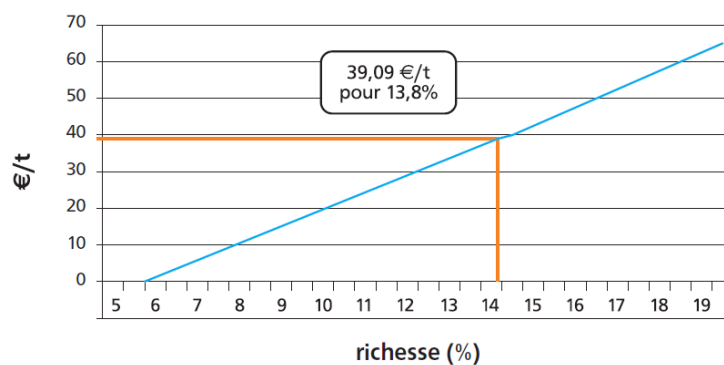


FIGURE 10 – Prix de la tonne de canne en fonction de la richesse en sucre (source : Cahier technique de la canne n°15, Août 2008)

Type coupe	Mois	Centre	Variété
CL :848	juillet :171	lamare :134	R 570 :502
CLM : 32	août :208	boisrouge : 54	R 577 :165
	septembre :169	pentessassy : 16	R 579 :213
	octobre :171	beaufonds : 16	
	novembre :142	ravineglissante : 16	
	décembre : 19	baril : 8	
		langevin : 14	
		grandbois : 11	
		casernes : 7	
		gol : 8	
		stella :207	
		tamarins :199	
		grandpourpier :190	

Tableau 8 – Nombre de chargements ayant un ENA moyen différent de 0 pour chaque modalité des variables qualitatives du jeu de données sur la richesse

	Somme des carrés des écarts	Ddl	Statistique F	Pr(>F)
mois	118.82	1	51.32	<0.0001
mois <sup>2</sup>	145.77	1	62.96	<0.0001
centre	145.19	12	5.23	<0.0001
variété	31.72	2	6.85	0.0011
ENA	17.59	1	7.60	0.0060
type de coupe	47.74	1	20.62	<0.0001
mois×centre	42.02	4	4.54	0.0012
variété×type	5.90	1	2.55	0.1108
Résidus	1981.94	856		

Tableau 9 – Analyse de variance de type II des variables sélectionnées dans le modèle de perte de richesse, test de significativité des effets basé sur un test de Fisher au seuil de 5%

	Somme des carrés des écarts	Ddl	Statistique F	Pr(>F)
mois	121.16	1	52.24	< 0.0001
mois <sup>2</sup>	148.62	1	64.07	< 0.0001
centre	145.61	12	5.23	< 0.0001
variété	31.72	2	6.84	0.0011
ENA	18.17	1	7.83	0.0052
type de coupe	47.74	1	20.58	< 0.0001
mois×centre	41.50	4	4.47	0.0014
Résidus	1987.84	857		

Tableau 10 – Variables sélectionnées avec la procédure pas-à-pas (*both*) pour la modélisation de l'effet des dégâts sur les pertes de richesse, test de significativité des effets basé sur un test de Fisher au seuil de 5%

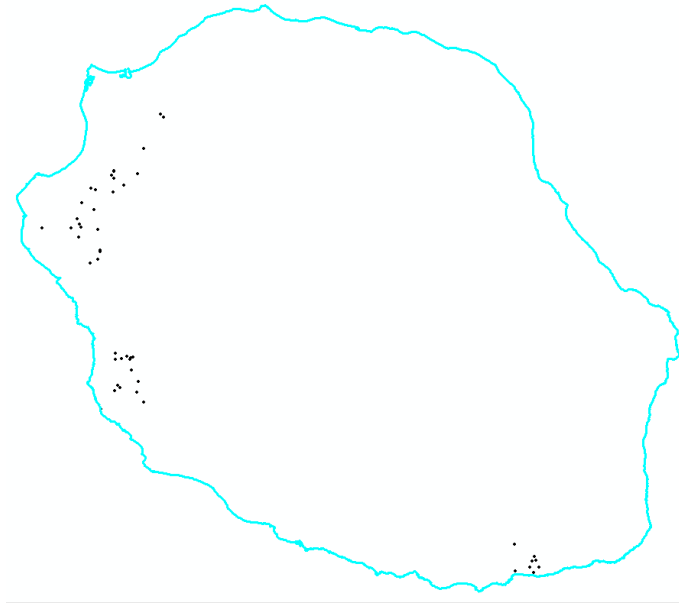


FIGURE 11 – Localisation des parcelles géoréférencées à la Réunion durant la campagne sucrière de 2013 (un point correspond à une parcelle) (données Tereos)

Effet	Variance (kg <sup>2</sup> )	Ecart-type (kg)	Statistique (Chisq)	Pr(>Chisq)
Parcelle	0.2713728	0.52093	-	-
Parcelle× ENT	0.0005995	0.02448	364.87	<10 <sup>-6</sup>
Parcelle× ENA	0.0008794	0.02965	86.99	<10 <sup>-6</sup>
Résidus	0.1096525	0.33114		

Tableau 11 – Valeur des paramètres des effets aléatoires pour la modélisation de la masse de tige individuelle en fonction de ENT et ENA

Variété	Région
Inconnue : 6	Ouest :40
R 570 :32	Sud : 8
R 573 : 1	
R 575 : 1	
R 577 : 4	
R 579 : 4	

Tableau 12 – Nombre de parcelles pour chaque modalité des variables qualitatives des données de structure et composition du paysage

Taille de l'échantillon	Moyenne de $\mu_p - \mu_c$
20	-0.002 [-0.05 ; 0.06]
40	0.001 [-0.03 ; 0.05]

Tableau 13 – Différence moyenne (sur 200 parcelles) entre la valeur parcelle  $\mu_p$  et la valeur calculée  $\mu_c$  avec des échantillons de 20 et 40 tiges et étendue de cette différence entre crochets

## Annexe : Génération d'ENA par parcelle ( $\mu_p$ )

Pour chaque couple variété/région étudiée, on détermine à partir des moyennes observées sur les chargements ( $\mu_c$ ) une façon de générer des vraies moyennes sur la parcelle ( $\mu_p$ ). Les couples variété/région pris en compte sont :

- R 570 Sud
- R 570 Est
- R 570 Ouest
- R 577 Ouest
- R 579 Est
- R 579 Ouest

Les autres couples n'ont pas pu être étudiés car il y avait trop peu de données disponibles. Pour chaque couple variété/région :

1. On modélise la distribution des moyennes observées  $\mu_c$  par une loi Zero Inflated Binomial Negative (notée ZINB), c'est-à-dire une loi BN autorisant un nombre important de valeurs nulles. On travaille donc sur le cumul des ENA sur les vingt tiges pour avoir des nombres entiers. A l'aide de la fonction `vglm {VGAM}` (Yee, 2010), on détermine les paramètres de la ZINB (exemple de résultat voir figure 12). On peut donc générer pour chaque couple variété/région des chargements  $\mu_c$

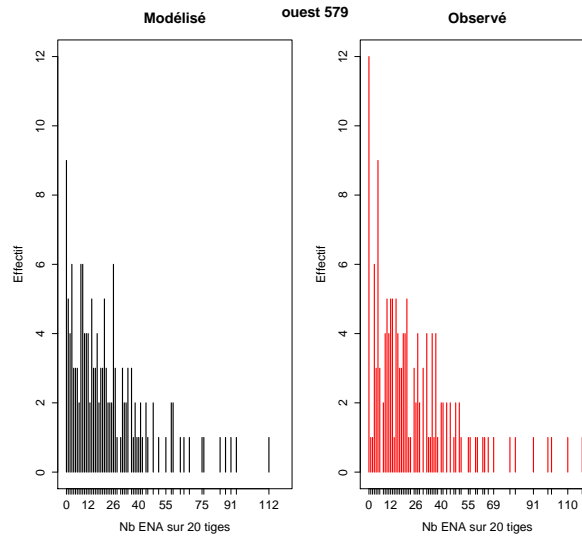


FIGURE 12 – Exemple de résultat de la modélisation d'attaque moyenne sur un chargement,  $\mu_c$ , par la ZINB (à gauche), à partir des données observées (à droite) de la variété R 579 dans l'Ouest

2. On génère 10 000 chargements ( $\mu_c$ ) à partir de la ZINB. On calcule la probabilité d'obtenir chaque  $\mu_c$  sachant plusieurs valeurs de  $\mu_p$ . Les valeurs de  $\mu_p$  sont sélectionnées selon l'étendue des valeurs de  $\mu_c$  observées. On a donc pour chaque valeur  $\mu_c$  différentes probabilités selon les valeurs de  $\mu_p$ .
3. On effectue un tirage dans les valeurs de  $\mu_p$  pondéré par les probabilités calculées en 2. Plus la probabilité d'avoir observée un  $\mu_c$  sachant un certain  $\mu_p$  est importante, plus on a de chance de tirer cette valeur  $\mu_p$ . On génère ainsi 10 000 moyennes  $\mu_p$ .

On peut ainsi générer 10 000 parcelles ( $\mu_p$ ) avec des moyennes d'attaque vraies à partir des observations sur les chargements ( $\mu_c$ ).

## Annexe : Calcul des indices de connectivité d'Hanski et C

Pour chaque parcelle étudiée  $j$ , soit  $i$  chaque polygone de canne se trouvant dans la zone tampon de  $j$ .  $d_{ij}$  est la distance entre le centroïde de  $j$  et de  $i$ ,  $S_i$  est la surface du polygone  $i$ .


Les indices de connectivité sont les suivants :

$$\text{Hanski}_j = \sum_{i \neq j} e^{-\alpha d_{ij}} S_i^b$$

$\alpha$  et  $b$  sont des paramètres caractéristiques de la distance de dispersion de l'insecte et sont tous les deux fixés à 0.5 dans notre étude.

$$C_j = \sum_{i \neq j} S_i \cdot \exp(-d_{ij}/D)$$

$D$  est une constante de mobilité qui correspond à la distance de vol de l'espèce, comprise entre 100 et 200m pour d'autres espèces de Crambidae ([Mazzi & Dorn, 2012](#)).

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronome Spécialisation / option : Statistique Appliquée Enseignant référent : David Causeur	
Auteur(s) : Maryse Wong-Ah-See  Date de naissance* : 15 mai 1991		Organisme d'accueil : CIRAD Adresse : 7 chemin de l'Irat, 97410 Saint Pierre , La Réunion
Nb pages : 25	Annexe(s) : 7	Maître de stage :
Année de soutenance : 2014		Samuel Nibouche Frédéric Chiroleu
<p>Titre français : Le foreur ponctué de la canne à sucre, <i>Chilo sacchariphagus</i>, à l'île de la Réunion: précision de l'échantillonnage, estimation des pertes et effet de la structure du paysage sur l'intensité des dégâts</p> <p>Titre anglais : The sugarcane spotted stalk borer, <i>Chilo sacchariphagus</i>, in Reunion Island: sampling plans, estimation of the damage and effect of landscape composition on pest abundance</p>		
<p>Résumé (1600 caractères maximum) :</p> <p>Le foreur ponctué de la canne à sucre, <i>Chilo sacchariphagus</i>, est actuellement la priorité phytosanitaire de la filière canne à la Réunion. Des procédures d'échantillonnage ont été mises en place pour assurer son suivi, et il est nécessaire de quantifier leur précision. Pour cela, on estime la distribution du ravageur : celle-ci diffère selon les variétés de cannes. Afin de connaître les pertes économiques provoquées par ce ravageur, les fonctions de dommage sur le rendement et sur la richesse en sucre sont déterminées : en moyenne, un entre nœud attaqué provoque une perte de 32g par tige et une perte de 0.2 points de richesse. Les régions de l'île ayant d'importantes pertes économiques sont l'Ouest, quelle que soit la variété, et le Sud pour la variété R579. Pour expliquer cela, une étude de l'effet de la structure du paysage sur les dégâts est réalisée. La fragmentation du paysage et de l'habitat canne ont un impact négatif sur les attaques grâce à un éventuel effet positif sur les populations d'ennemis naturels.</p>		
<p>Abstract (1600 caractères maximum) :</p> <p>The sugarcane spotted stalk borer, <i>Chilo sacchariphagus</i>, is currently the main priority of the phytosanitary actions of the sugarcane industry in Reunion Island. To follow-up the infestation by this pest, sampling plans have been set up and it is necessary to assess their accuracy. For this purpose, the distribution of <i>C. sacchariphagus</i> is ascertained. This distribution is different among sugarcane varieties. In order to estimate how much economic losses are caused by this pest, the damage functions on yield and on sugar content are estimated. The weight loss of a stalk having one bored internode is 32g, and the sugar content loss for the same injury level is 0.2%. The plots on the west of Reunion Island, whatever varieties cultivated, and the ones cultivated with R579 in the south, are the ones subjected to important economic losses. To explain this analysis, we study the effect of landscape composition on pest abundance. Landscape and sugarcane surface patchiness reduce pest abundance thanks to a potential indirect effect on the natural enemies populations.</p>		
<p>Mots-clés :Chilo sacchariphagus, foreur, canne à sucre, Réunion, distribution, fonction de dommage, structure du paysage</p> <p>Key Words: Chilo sacchariphagus, borer, sugarcane, Reunion, distribution, damage function, landscape composition</p>		

\* Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires

Document à déposer sur moodle en format .txt